



Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué - Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision -

A. Merot

► To cite this version:

A. Merot. Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué - Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision -. domain_other. Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier - AGRO M, 2007. Français. NNT : . tel-00560250

HAL Id: tel-00560250

<https://theses.hal.science/tel-00560250>

Submitted on 27 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

Discipline : Agronomie

Formation Doctorale : Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels Et Cultivés

***Ecole Doctorale : Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences,
Hydrosciences et Environnement***

Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué

***- Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de
l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision -***

présentée et soutenue publiquement

par

Anne MEROT

Septembre 2007

Jury composé de :

Benoit Jaillard, *Ecole Doctorale*
Philippe Debaeke, *Rapporteur*
Enrique Playan, *Rapporteur*
Jacques Wery, *Directeur de thèse*
Jacques-Eric Bergez, *Invité*
Alain Capillon, *Invité*
Carole Isbérie, *Invité*
Jean-Claude Mailhol, *Invité*

REMERCIEMENTS

L'écriture des remerciements est sûrement une des plus terribles épreuves de la thèse. On souhaite remercier tout le monde et on a peur d'en oublier. On voudrait exprimer une reconnaissance sincère mais les mots sont un peu faibles. Je ferai donc simple.

Depuis le démarrage de ce travail, j'ai toujours considéré cette thèse comme un projet collectif. Naturellement, j'ai rédigé cette thèse sur le ton du nous plutôt que du je : Nous avons donc observé tout plein de choses et nous avons beaucoup réfléchi durant ces trois années.

Chaque groupe de travail a son fonctionnement, son rythme. Nous avons travaillé régulièrement pendant ces mois. Cela n'a pas toujours été évident. Etant en thèse CIFRE hébergée à la Société du Canal de Provence à Aix en Provence, j'ai souvent regretté de ne pas être plus proche de Montpellier ou de Toulouse pour discuter, échangé plus souvent des idées avec d'autres thésards, les membres du labo et bien sûr tous les participants au projet. Mais heureusement le téléphone et internet fonctionnent bien. Ces regrets sont cependant largement compensés par l'accueil et les conditions de travail que j'ai pu avoir à la SCP. L'autonomie qui m'y a été donnée et la confiance ne sont pas pour rien dans la réussite de ce projet. J'ai pu me consacrer entièrement à mon travail de thèse tout en m'initiant au fonctionnement d'une société d'aménagement régionale. Bien sur, il aurait été très enrichissant de participer à certains projets engagés par la SCP mais cela aurait ralenti le travail de thèse. Car je n'oublie pas les attentes des agriculteurs de Crau, des gestionnaires de canaux. Le développement reproche souvent à la recherche son manque d'opérationnalité. Durant ce travail, il a fallu veiller à valoriser les résultats. Depuis le démarrage, je ne compte plus les réunions organisées pour faire ce lien entre la recherche et le développement. Je n'ai eu de cesse d'essayer de concilier les attentes de chacun en droite lignée de l'idéologie prônée au Domaine du Merle.

On m'avait dit que la thèse c'était un chemin de croix, que pour rédiger il fallait travailler les nuits et les week-ends. Bien sur, je me suis arrachée les cheveux pour me réapproprier le sujet, discuter mes résultats... Pourtant, je ne parlerai pas de la thèse en ces mots. Je n'ai pas travaillé la nuit ! Il est important je pense de rassurer de futurs thésards sur ce

point. Le plus important étant de travailler régulièrement mais aussi d'être bien entouré. J'ai été bien entourée dans le travail et en dehors.

Je tenais donc à remercier en tout premier lieu mes co-équipiers. J'aurais souhaité afficher tous vos noms dans le jury pour vous exprimer ma reconnaissance mais ce n'est pas possible, j'utiliserai donc cet espace particulier des remerciements.

Un immense merci à Jacques-Eric Bergez pour avoir été présent régulièrement tout au long de ce travail, pour m'avoir éclairée sans relâche, merci pour ta disponibilité, merci pour ton investissement.

Un grand merci aussi à Jean-Claude Mailhol, merci de m'avoir fait découvrir un monde où l'eau s'écoule et s'infiltré ; merci à Carole Isbérie, j'ai apprécié nos discussions sur la tensiométrie.

Un grand merci à Alain Capillon, merci pour le temps consacré aux agriculteurs de Crau, merci pour le recul que tu m'as fait prendre dans ce travail

Enfin j'adresse tout ma gratitude à Jacques Wery pour le chapeau de directeur de thèse et tout ce que ce chapeau implique.

Merci à tous de m'avoir soutenue lorsque la date d'envoi du rapport de thèse a été avancée, merci pour les échanges...

...J'espère que nous en aurons encore d'autres.

Merci à François Prévost pour m'avoir fait confiance alors que mon stage se terminait juste et m'avoir permis de travailler dans d'aussi bonnes conditions.

Je remercie enfin François Charron, il est à l'origine de ce travail. Il est à l'origine de ce travail. Merci de m'avoir fait confiance dès le départ puis d'avoir suivi ce projet de près en veillant au respect des intérêts de chacun.

J'ai aussi une pensée pour ceux qui ont contribué un peu moins à ce travail mais quand même...

Merci à la communauté scientifique – aux habitants du bâtiment 27 de l'Agro de Montpellier nouvellement Supagro, à tout l'UMR System sous les rênes de Jacques Wery, je pense notamment à François Lelièvre, Florence Volaire, Dominique Martinez-Ouillié. Merci aussi à la communauté scientifique d'Avignon et l'équipe Climat-Sol-Environnement : Françoise Ruget et Nadine Bertrand pour les échanges nombreux sur les prairies et leur étude. Merci aussi à la communauté Toulousaine de l'UMR Agir sous la coupe de Michel Duru, merci à Daniel Wallach de m'avoir initiée au paramétrage des modèles et Michel Duru pour avoir accepté que je travaille sur votre modèle de culture. Je n'oublie pas aussi les habitants d'Agropolis. Merci à Sami Bouarfa et l'équipe ENVIRRI du Cemagref en particulier Pierre Ruelle qui m'avait déjà accueillie en stage il y a quelques années.

Merci aux thésards que j'ai rencontré, Florian Celette, Hector Valdès.

Un grand merci aux nombreux stagiaires qui ont participé aux expérimentations. Dans l'ordre chronologique, merci à Mickael Drouet, Jérémy Boisseau, Florence Willaert, Sylvain Gauthier, Linda Palm, Mathieu Salomone. J'ai beaucoup apprécié notre travail, je suis même assez fière d'avoir transmis la passion des petites fleurs à certains d'entre vous. Bonne continuation.

Merci au personnel de la SCP. Je tiens à remercier tout le service Aménagement. Merci aussi à Jean-François Brun et Frank Sanfilippo. Merci à mon ex et futur, d'un déménagement à l'autre, voisin de bureau Jean-Vincent. Merci à tous les ex-habitants du bâtiment S, Françoise, Alain et Alain, Marie, Philippe, Clairette, Isabelle, Claude et aux habitants du bâtiment W.

Ma thèse doit beaucoup à la population du Domaine du Merle, merci pour votre accueil chaleureux. Je remercie le directeur du Domaine du Merle Pierre-Marie Bouquet ainsi que tout le personnel du Domaine Céline, Jean-Do, Daniel, Chantal. Merci Driss d'avoir patiemment accepté d'irriguer les parcelles expérimentales quand je te le demandais - sans poser de questions et même si cela ne te paraissait pas clair ! Merci Mickael pour ta gentillesse.

Merci aux prairies de produire du foin, merci aux moutons de les pâturer, merci à l'herbe d'être verte.

J'ai un battement de cœur aussi pour mes amis, merci d'être là. Vous avez participé à votre manière à ce projet, il ne me vient qu'une idée – gros bisous cantalous (mais bretons quand même). Que de chemin parcouru depuis la rue Edgar Quinet – 29000 Quimper, la rue des plantes – 35000 Rennes, le campus de la Gaillarde – 34000 Montpellier. J'espère que nous nous retrouverons tous sur une plage au bord de la mer, en Bretagne par exemple.

Merci Papa, merci Maman

Merci Frangin,

Merci Mamie, Papi, Mamoune et toi aussi Papou qui m'a donné le goût des plantes.

Merci François.

A vous tous. Je vous dois beaucoup trop pour l'exprimer en si peu de temps.

Je remercie enfin

le Domaine du Merle qui grâce à son Comité Scientifique des Utilisateurs a permis l'émergence de ce projet de recherche puis son bon déroulement.

la Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région Provençale SCP pour m'avoir accueillie pendant ces 3 années et m'avoir fait partager sa vision de l'aménagement régional de la Provence.

l'Association Nationale de la Recherche Technologique ANRT pour la demi bourse de thèse qui a été attribuée à la Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région Provençale pour mener à bien ce projet.

les membres du Comité de suivi de cette thèse, professionnels de l'eau ou de l'agriculture, institutionnels d'avoir suivi cette thèse avec intérêt en espérant qu'il y ait une suite.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	11
1. LE CONTEXTE DE LA GESTION DE L'EAU AGRICOLE DANS LE MONDE ET EN FRANCE.....	11
2. LA PROBLEMATIQUE DE L'IRRIGATION DANS LA PLAINE DE CRAU.....	12
3. L'ORIGINE DE CE TRAVAIL : LES ATTENTES DU DEVELOPPEMENT AGRICOLE.....	13
4. CONSTRUCTION DU TRAVAIL DE THESE.....	14

I. UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE PRAIRIAUX PLURISPECIFIQUES IRRIGUES 17

I.1. POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE DU TRAVAIL	17
I.1.1. LES ENJEUX DE RECHERCHE LIES A LA GESTION DE L'EAU	17
I.1.2. CONCEVOIR DE NOUVEAUX SYSTEMES DE CULTURES PRAIRIAUX IRRIGUES .	18
I.1.2.1. Conception de systèmes de culture plurispécifiques	18
I.1.2.2. Conception de systèmes de culture prairiaux irrigués	20
I.1.2.3. Conception de systèmes de culture assistée par modèle	21
I.2. PROBLEMATIQUE DE LA THESE :	22
I.3. DECLINAISON DE LA PROBLEMATIQUE DE THESE	22
I.3.1. APPROCHE SYSTEMIQUE DU SYSTEME DE CULTURE	22
I.3.2. LA PROBLEMATIQUE DE THESE DECLINEE EN 4 OBJECTIFS SCIENTIFIQUES...	23
I.4. DEMARCHE SCIENTIFIQUE	24
I.4.1. ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LE SYSTEME BIOPHYSIQUE	24
I.4.1.1. Acquisition de connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé centrées sur l'eau - le peuplement végétal et sur l'adaptation de l'irrigation	24
I.4.1.2. Des questions de connaissances qui renvoient à des questions méthodologiques	26
I.4.2. MODELISATION DU SYSTEME BIOPHYSIQUE POUR SIMULER LE FONCTIONNEMENT DU SOUS-SYSTEME SOL-PLANTE-LAME D'EAU	26
I.4.2.1. Modélisation de l'irrigation à la planche	26
I.4.2.2. Modélisation d'une prairie plurispécifique et permanente	27
I.4.2.2.1. Spécificités des prairies plurispécifiques	27
I.4.2.2.2. Adaptation d'un modèle de culture au cas de la prairie de Crau	29
I.4.3. ACQUISITION DE CONNAISSANCES SUR LE SYSTEME DECISIONNEL DES AGRICULTEURS ET DES DETERMINANTS DU SYSTEME TECHNIQUE	30
I.4.4. MODELISATION DU SYSTEME DECISIONNEL DES AGRICULTEURS	31

II. MATERIEL ET METHODE 34

II.1. PRATIQUES DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE PAR SUBMERSION ET RUISSELLEMENT	34
II.2. LA PLAINE DE CRAU : UN TERRAIN D'ETUDE EXEMPLAIRE POUR LA MULTIFONCTIONNALITE DE L'AGRICULTURE IRRIGUEE	35
II.2.1. UN CLIMAT DE TYPE MEDITERRANEEN FREQUEMMENT SOUMIS A DES VENTS VIOLENTS	35
II.2.1.1. Le climat de la plaine de Crau	35
II.2.1.2. Le climat des années d'expérimentation (Source : Domaine expérimental du Merle)	37
II.2.2. LES SOLS DE CRAU	38
II.2.3. LA NAPPE SUPERFICIELLE DE CRAU	39
II.2.4. LES PRAIRIES PLURISPECIFIQUES DE LA PLAINE DE CRAU	40

II.2.5.	L'AGRICULTURE EN CRAU ET LES EXPLOITATIONS AGRICOLES PRODUCTRICES DE FOIN AOC	42
II.3.	LES METHODES D'ETUDE DEVELOPPEES DANS CE PROJET	47
II.3.1.	L'EXPERIMENTATION POUR MIEUX COMPRENDRE LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME BIOPHYSIQUE.....	48
II.3.1.1.	Dispositif expérimental (Annexe 3).....	48
II.3.1.2.	Données collectées.....	49
II.3.2.	LES ENQUETES POUR MIEUX CONNAITRE LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TECHNIQUE ET DECISIONNEL (ANNEXE 4)	51
II.3.2.1.	Choix du dispositif d'enquête pour collecter des données sur le système décisionnel des agriculteurs	51
II.3.2.2.	Délimitation du domaine d'étude et échantillonnage.....	51
II.3.2.3.	La grille d'enquête (Annexe 4)	53
II.3.3.	LA MODELISATION POUR REPRODUIRE LE FONCTIONNEMENT DES DIFFERENTS COMPARTIMENTS DU SYSTEME DE CULTURE	53
II.3.3.1.	Modèle d'avancement de la lame d'eau.....	53
II.3.3.2.	Modèle de culture et de bilan hydrique.....	55
II.3.3.3.	Modèle décisionnel	56

III. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME PRAIRIAL SOUS DEFICIT HYDRIQUE MODERE..... 58

III.1.	OBJECTIFS ET DEMARCHE.....	58
III.2.	CE QU'IL FAUT RETENIR.....	60
III.2.1.	LES PRAIRIES PLURISPECIFIQUES DE CRAU SONT TRES SENSIBLES A DES DEFICITS EN EAU DU SOL MODERES	60
III.2.2.	PILOTAGE DE L'IRRIGATION DES PRAIRIES ET MODIFICATION DES FREQUENCES D'IRRIGATION.....	61
III.3.	ARTICLE: RESPONSE OF A PLURISPECIFIC PERMANENT GRASSLAND TO BORDER IRRIGATION REGULATED BY TENSIOLOGIES.....	62

IV. MODELISATION DU SOUS-SYSTEME BIOPHYSIQUE : SOL-PLANTE-LAME D'EAU 79

IV.1.	OBJECTIF ET STRUCTURE DU CHAPITRE	79
IV.2.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE COLLECTE DES DONNEES POUR LE PARAMETRAGE DES MODELES.....	80
IV.3.	MODELISATION DE L'AVANCEMENT DE LA LAME D'EAU ET COUPLAGE AVEC UN MODELE DE CULTURE.....	80
IV.3.1.	OBJECTIFS ET DEMARCHE.....	80
IV.3.2.	METHODOLOGIE.....	81
IV.3.2.1.	Les adaptations réalisées au modèle SIP (Simulation Irrigation Prairie)	81
IV.3.2.2.	Paramétrage de l'avancement.....	82
IV.3.3.	RESULTATS	82
IV.3.3.1.	La simulation de l'avancement.....	82
IV.3.3.2.	Couplage du modèle d'avancement avec un modèle de culture : le modèle SPFC	83
IV.3.4.	ARTICLE: SPFC: A TOOL TO IMPROVE WATER MANAGEMENT AND HAY PRODUCTION IN THE CRAU REGION	84
IV.4.	MODELISATION DE LA DYNAMIQUE DE CROISSANCE ET DU BILAN HYDRIQUE.....	102
IV.4.1.	OBJECTIFS ET DEMARCHE.....	102

IV.4.2. METHODOLOGIE	102
IV.4.2.1. Les adaptations réalisées au modèle prairie	102
IV.4.2.2. Méthode d'estimation des paramètres	103
IV.4.3. RESULTATS	104
IV.4.4. ARTICLE: ADAPTATION OF A FUNCTIONAL MODEL OF GRASSLAND TO SIMULATE THE FUNCTIONING OF IRRIGATED GRASSLANDS UNDER A MEDITERRANEAN CLIMATE: THE CRAU CASE	104
<u>V. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TECHNIQUE ET CONCEPTION D'UN MODELE CONCEPTUEL DU SYSTEME DECISIONNEL A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE</u>	<u>125</u>
V.1. OBJECTIFS ET DEMARCHE	125
V.2. METHODOLOGIE	125
V.3. RESULTATS	126
V.3.1. ANALYSE DU SYSTEME DE CULTURE ET DE LA GESTION DE L'IRRIGATION..	126
V.3.2. LE MODELE CONCEPTUEL DES DECISIONS	127
V.4. ARTICLE: ANALYSING FARMERS PRACTICES TO DESIGN A CONCEPTUAL MODEL OF THE DECISION SYSTEM THAT DETERMINES THE TECHNICAL MODEL OF THE FARMING SYSTEM: APPLICATION TO THE CRAU HAY SYSTEM	127
<u>VI. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES</u>	<u>146</u>
VI.1. ETUDE ET MODELISATION DU SYSTEME BIOPHYSIQUE A L'ECHELLE PARCELLAIRE.....	147
VI.1.1. LE SYSTEME DE CULTURE PRAIRIAL IRRIGUE ET LE DEFICIT HYDRIQUE MODERE	147
VI.1.2. L'ETUDE DE SYSTEMES PLURISPECIFIQUES	149
VI.1.3. MODELISATION DU SYSTEME BIOPHYSIQUE.....	151
VI.2. AMELIORATION DE L'EFFICIENCE D'IRRIGATION ET ECONOMIES D'EAU	153
VI.3. CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE ASSISTEE PAR DES MODELES	154
VI.3.1. REPRESENTER LE FONCTIONNEMENT DE L'EXPLOITATION ET LES DECISIONS DE L'AGRICULTEUR.....	154
VI.3.2. COORDONNER DES METHODES POUR CONCEVOIR DES SYSTEMES DE CULTURE 155	
VI.3.3. CONSTRUIRE UN MODELE DE SIMULATION DU SYSTEME PRAIRIAL IRRIGUE PAR GRAVITE.....	156
VI.4. VERS LA CONSTRUCTION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR CONCEVOIR DES SYSTEMES DE CULTURE	157
<u>VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>160</u>
<u>VIII. TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX</u>	<u>170</u>
<u>IX. TABLE DES ANNEXES.....</u>	<u>171</u>
<u>X. ANNEXES</u>	<u>173</u>
<u>XI. RESUME</u>	<u>200</u>

INTRODUCTION

1. Le contexte de la gestion de l'eau agricole dans le monde et en France

L'agriculture irriguée s'est développée dans le monde, l'eau étant le facteur de production limitant dans toutes les régions chaudes. En un demi-siècle en France, les surfaces irriguées ont plus que triplé (Gleyses et Rieu, 2004b). Cette augmentation s'explique notamment par l'augmentation de la demande en eau agricole en lien avec l'augmentation démographique et donc des besoins accrus de la population. Avec la notion « d'or bleu » apparue il y a une vingtaine d'années, les hommes ont pris conscience que l'eau était une ressource limitée qui devait être mieux partagée (Montginoud, 1997). La reconnaissance des différents usages de l'eau – eau publique, industrielle, agricole, écologique et pour la qualité de vie – a aussi conduit les différents acteurs du monde de l'eau à réfléchir sur les arbitrages pour son partage. Ceci a été et est encore à l'origine de conflits géopolitiques parfois très forts d'autant que 24% des surfaces irriguées mondiales se sont dégradées suite à des phénomènes de salinisation (Postel, 1989).

L'eau agricole représente 70% des prélèvements d'eau douce dans le monde (source FAO¹). En France, l'agriculture représente une part importante des prélèvements totaux avec 4,8 milliards de mètre cubes d'eau prélevés (Levy et al., 2005) mais ces prélèvements sont localisés en période estivale atteignant jusqu'à 80% de la consommation de cette période dans certaines régions (Gleyses et Rieu, 2004b).

L'irrigation est actuellement beaucoup critiquée par les écologistes et les politiques : d'une part pour les quantités d'eau consommées, d'autre part pour les risques de lixiviation des nitrates et pesticides et donc de pollution résultant le plus souvent d'une mauvaise gestion de l'irrigation (Gleyses, 2004a). Il existe un réel besoin de concilier économie et équilibre écologique dans la gestion de l'irrigation.

Ce besoin est accentué par le changement climatique majeur: depuis quelques années, les gestionnaires de l'eau en France imposent régulièrement des restrictions de l'offre en eau agricole en période estivale dans certaines régions sensibles comme la Charente. Ceci montre une vulnérabilité de certains systèmes de production irrigués notamment les systèmes intensifs comme le maïs. A cet égard, des politiques de tarification ont été récemment initiées

¹ <http://www.fao.org/newsroom/fr/focus/2007/1000521/index.html>

afin de garantir efficacité et équité de l'allocation de la ressource (Loubier et al., 2007). Même pour les systèmes prairiaux généralement non irrigués, la question de l'irrigation est soulevée pour l'approvisionnement en fourrage des élevages.

L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation est un défi que doit relever actuellement la recherche (Wallace, 2000). Ce travail doit être fait en tenant compte des multi-usages de l'eau, des externalités de l'irrigation, ainsi que de la sensibilité des systèmes de production aux modifications des pratiques d'irrigation (Tiercelin, 2007).

L'irrigation gravitaire est la principale technique d'irrigation au monde, 80% des surfaces irriguées dans le monde le sont par gravité. Mais ce système est aussi le moins économe en eau, l'efficacité globale de l'irrigation étant estimée à 60-70% (Tiercelin, 2007) et 50-90% selon Clemens (2002). La recherche d'une meilleure efficacité est donc un objectif majeur pour ce mode d'irrigation pour lequel les externalités² sont très fortes (Ladki et al., 2006). Cette question est complexe car l'irrigation gravitaire a aussi conduit à une modification importante des schémas hydrologiques locaux (salinisation, zones de marais, recharge de nappe, réseaux hydrauliques, inondations...).

2. La problématique de l'irrigation dans la plaine de Crau

La plaine de la Crau (Sud-Est de la France) est un parfait exemple de remise en cause des schémas traditionnels d'irrigation dans le cadre d'une agriculture multifonctionnelle. Depuis plus de quatre siècles, les mêmes schémas d'irrigation sont appliqués. Ancien delta fossile de la Durance, le territoire de Crau³ est une plaine steppique (Boutin et Cheylan, 2004) de 600 km² sans réseau hydrographique superficiel naturel. L'arrivée de l'irrigation dans les années 1554 est à l'origine d'un deuxième écosystème la Crau humide classé Natura 2000 aujourd'hui.

L'eau d'irrigation en plaine de Crau trouve sa source dans les montagnes des Alpes. La fonte des neiges alimente le barrage de Serre-Ponçon situé sur la rivière Durance. Ce barrage datant des années 1955 est une zone cruciale de partage des eaux. Les différents usages représentés sur le barrage sont : la production d'électricité par EDF, le tourisme avec la base de loisir sur

² Effets économiques induits, externes, négatifs ou positifs

³ Crau sèche ou coussouls en provençal classée en réserve naturelle de Crau et Zone de Protection Spéciale ZPS.

le barrage, l'irrigation des terres agricoles en aval, l'eau écologique et paysagère correspondant au maintien d'un niveau d'eau minimum dans la Durance. Des prises d'eau pour l'irrigation se situent tout au long du canal EDF, l'une d'entre elles permettant d'alimenter l'ensemble de la plaine de Crau à hauteur de $31.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Les prairies multi-spécifiques de Crau représentent 12 500 ha (100 000 tonnes de foin vendu sous l'AOC foin de Crau) soit la moitié des surfaces agricoles (Comité de Crau, 2003 ; 2004). La plaine de Crau est irriguée par gravité à la planche. Depuis la prise sur le canal EDF, 400 km de canaux principaux et secondaires sont gérés par des associations syndicales d'irrigants et 1600 km de filioles⁴ privées (Comité du foin de Crau, 2004). Les volumes d'eau apportés à l'hectare sont très élevés (15 000 à 20 000 $\text{m}^3 \cdot \text{an}^{-1}$) mais 80% de cette eau est restituée au milieu naturel (Saos, 2006). L'irrigation recharge en eau la nappe superficielle de Crau à hauteur de 70%. La nappe de Crau a un rôle stratégique dans la région puisqu'elle assure l'alimentation en eau potable de plus de 250 000 personnes.

Ces dernières années, l'augmentation de la demande en eau au niveau du barrage de Serre-Ponçon a conduit à une remise en cause de la gestion de l'eau en Crau, les principaux volumes d'eau étant attribués à l'irrigation. Economiser de l'eau, pour la laisser dans le barrage, n'est pas une priorité actuellement (Balland et al., 2002) mais les agriculteurs sont encouragés à limiter leurs consommations. Ces derniers revendiquent la multifonctionnalité de leur agriculture et notamment leur participation à la recharge de la nappe

Il existe donc une forte attente sociétale pour améliorer la gestion de l'eau en Crau sans modification fondamentale de l'économie agricole et des schémas hydrologiques de la zone.

Les agriculteurs sont aussi confrontés à des problèmes de main d'œuvre : l'irrigation gravitaire nécessite une présence de l'arroseur 24h sur 24h pendant 7 mois. Etant données la législation du travail et la difficulté à embaucher une personne acceptant de telles conditions de travail, la production de foin en est d'autant fragilisée.

3. L'origine de ce travail : les attentes du développement agricole

Les agents du développement agricoles et les gestionnaires territoriaux sont directement interpellés par les problèmes de gestion de l'eau. Ils ont exprimé leur besoin de références et d'argumentaires objectifs pour réfléchir à la rénovation du système de gestion de l'eau en

⁴ Les filioles correspondent aux petits canaux en terre qui conduisent l'eau des canaux principaux collectifs directement aux parcelles.

Crau. Le Domaine du Merle, domaine expérimental agricole de la plaine de Crau, rassemble chaque année ces agents de développement et de gestion pour identifier des questions posées et consulte la recherche pour instruire ces demandes. L'identification de questions de recherche résulte donc de réflexions opérationnelles pratiques des professionnels de Crau.

Notre travail de recherche a été initié par le Domaine du Merle et réalisé dans le cadre d'une thèse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche cofinancée par l'Association Nationale de la Recherche Technique) en partenariat avec la Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale SCP.

4. Construction du travail de thèse

Dans ce contexte, les méthodes d'étude des systèmes de culture développées en agronomie permettent d'apporter des outils pour l'aide à la réflexion. Le recours à la modélisation des systèmes de culture est couramment admis comme indispensable pour répondre à ce type d'interrogation. En effet, l'agencement de combinaisons de techniques, de contraintes, de cultures et de climats conduit à privilégier l'utilisation de modèles pour tester différents scénarios. La modélisation permet de générer des systèmes de culture, de les tester et de les évaluer (Dore et al., 2006). Des outils d'aide à la décision, à l'échelle de l'exploitation, couplant des modèles biophysiques à des modèles décisionnels, ont émergé ces dernières années notamment en irrigation par aspersion (Leroy et al., 1997 ; Bergez et al., 2001). Dans ce projet, il a été envisagé de mettre à profit ces compétences agronomiques pour élaborer un outil d'aide à la décision pour réfléchir à la gestion de l'eau en Crau et tester différents scénarios de gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole.

Dans le cadre de notre recherche, nous proposons de réfléchir à la conception de nouveaux systèmes de culture basés sur le maintien des prairies et de l'irrigation gravitaire en zone méditerranéenne. Nous étudions les prairies multi-spécifiques et irriguées par gravité à l'échelle du champ cultivé et du système de culture. Nos deux objets de recherche sont le système biophysique et le système décisionnel déterminant le système technique. Nous analysons successivement leur fonctionnement et cherchons à les modéliser comme un premier pas vers la construction d'un modèle de simulation du fonctionnement du système de culture.

Ce document est découpé en trois parties.

- La première partie présente la problématique replacée dans son contexte scientifique et la démarche détaillée (Chapitre I) puis la description des matériels et méthodes mis en œuvre au cours de ce travail (chapitre II). Une revue bibliographique ciblée est incluse dans la définition de la problématique.
- La deuxième partie présente les résultats. Elle est découpée en 3 chapitres :
 - Le premier chapitre cherche à caractériser le fonctionnement du système prairial irrigué à l'échelle de la parcelle (Chapitre III) notamment la sensibilité de la prairie à un déficit hydrique modéré,
 - Le deuxième cherche à modéliser le fonctionnement du système prairial sous l'influence de l'irrigation à l'échelle de la parcelle (Chapitre IV). Les adaptations d'un modèle d'irrigation puis d'un modèle de culture sont présentées,
 - Le troisième cherche à analyser puis schématiser conceptuellement le fonctionnement de l'irrigation à l'échelle du système de culture en relation avec le système décisionnel des agriculteurs (Chapitre V). Ce chapitre aboutit à la construction d'un schéma conceptuel des décisions en lien avec l'irrigation qui déterminent le système technique.
- La troisième et dernière partie propose une discussion – synthèse à partir des résultats les plus significatifs et aborde la question du couplage de l'ensemble de ces résultats pour la construction d'un outil d'aide à la décision (Chapitre VI).

CHAPITRE I

UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA CONCEPTION

DE SYSTEMES DE CULTURE PRAIRIAUX

PLURISPECIFIQUES IRRIGUES

I. UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA CONCEPTION DE SYSTEMES DE CULTURE PRAIRIAUX PLURISPECIFIQUES IRRIGUES

I.1. Positionnement scientifique du travail

I.1.1. Les enjeux de recherche liés à la gestion de l'eau

L'efficacité de l'irrigation est un concept global qui peut être décomposé en une Efficacité de transport et Distribution de l'eau ED, une Efficacité d'Application AE et une efficacité d'utilisation de l'eau (WUE ou « Water Use Efficiency ») (Tiercelin, 2007). L'Efficacité de transport (ED (%)) = dose en entrée de parcelle / dose en entrée de réseau) est fortement dépendante du type d'ouvrage de transport qui va plus ou moins limiter le temps de transport, les pertes par évaporation et les fuites et à l'organisation de la distribution. L'Efficacité d'Application (AE (%)) = dose requise pour recharger le sol / dose appliquée ; Burt et al., 1997) varie en fonction du mode d'irrigation, du pilotage de cette irrigation et du climat. Cette efficacité d'application est souvent plus élevée sur des systèmes goutte à goutte (efficacité de 80 à 90%) qu'en aspersion (efficacité de 55-80%) et surtout qu'en irrigation gravitaire (efficacité 30%-40%; Tiercelin, 2007). L'Efficacité d'Application peut être faible à l'échelle de la parcelle mais excellente à l'échelle du périmètre lorsqu'une part de l'eau perdue au niveau de la parcelle est réutilisée sur le même périmètre (Clemmens, 2002). Enfin l'efficacité d'utilisation de l'eau WUE (WUE (%) = biomasse produite / dose apportée à la plante et retenue dans le sol) est fonction de la culture irriguée en relation avec le pilotage de l'irrigation et le climat.

Les enjeux de recherche actuels recouvrent l'étude de ces trois efficacités. En matière de gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole et de la parcelle, plusieurs axes de recherche sont développés pour :

- dégager des connaissances sur les relations sol-plante-eau (Wery, 2005),
- identifier des méthodes de pilotage de l'irrigation pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau (Oweis et al., 1998 ; White et Raine, 2004 ; DaCosta et Huang, 2006)

- dégager des connaissances sur la gestion quantitative et qualitative de l'eau en incluant les problématiques environnementales notamment les relations systèmes irrigués-nappe (Gay, 2002).
- dégager des connaissances sur les systèmes soumis à des sécheresses transitoires/aléatoires en lien avec le changement climatique (Brisson et al., 2006),
- concevoir des outils d'évaluation et d'exploration des systèmes agricoles à l'échelle de l'exploitation agricole et du système de production (McCown et al., 1996; Labbé et al., 1997 ; Labbé et al., 2000 ; Bergez et al., 2001).

I.1.2. Concevoir de nouveaux systèmes de cultures prairiaux irrigués

I.1.2.1. Conception de systèmes de culture plurispécifiques

La notion de système de culture s'applique à « l'ensemble des modalités techniques mise en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique : (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces cultures » (Sébillote, 1975 ; 1990). Le système de culture découle d'une vision systémique du champ cultivé divisé en compartiments (sol, plante, atmosphère,...) dont les composants interagissent. Ces compartiments évoluent dans le temps sous l'influence du climat, de l'environnement, des techniques (Dore et al., 2006). Concevoir des systèmes de culture implique donc de proposer (i) de nouvelles associations ou successions de culture, (ii) de nouvelles pratiques agricoles ou/et de nouvelles formes de mise en œuvre et pilotage de ces pratiques. Il s'agit de tenir compte des interactions complexes entre le champ cultivé (système biophysique) et les pratiques agricoles (système technique sous influence du système décisionnel) (Rapidel et al., 2006). Il s'agit aussi d'évaluer ces nouveaux systèmes sur la base de critères de performance du système agronomiques, environnementaux, socio-économiques (Loyce et Wery, 2006). La conception de systèmes de culture nécessite d'acquérir une vision globale et organisée de ce système de culture, des différents compartiments, des techniques et de leurs interactions. Beaucoup d'études se concentrent sur une composante du système – étude du système biophysique ou analyse des pratiques. Le lien entre les deux composantes du système n'est pas souvent réalisé et les travaux complets à l'échelle des systèmes de culture sont finalement peu nombreux (Chatelin et al., 2005). Bien souvent, la composante décisionnelle des systèmes

qui détermine les pratiques est laissée de côté d'où la difficulté d'appliquer ces systèmes culture dans les conditions des exploitations agricoles.

Les systèmes de culture en Europe sont basés quasi exclusivement sur la culture pure c'est-à-dire avec une seule espèce cultivée par parcelle au détriment de systèmes de cultures associées dont l'effet sur la biodiversité et l'environnement peut être très bénéfique (Pervanchon, 2004). Les prairies sont un des rares exemples de systèmes de culture plurispécifiques (voir paragraphe plus loin). Les réflexions sur la conception de tels systèmes sont peu avancées. Les interactions dans le système sont complexifiées par la présence de plusieurs cultures en compétition et en complémentarité dans le champ cultivé. Les connaissances spécifiques de tels systèmes plurispécifiques sont souvent insuffisantes en termes de fonctionnement du système biophysique et de critères d'évaluation. Les travaux sont limités à l'étude des interactions complexes entre deux espèces à l'échelle de la parcelle comme pour les systèmes agroforestiers (Mulia et Dupraz, 2006) ou dans le cas de vigne enherbée (www.umar_system.cirad.fr). Le manque de connaissances sur le fonctionnement biophysique des systèmes de culture plurispécifiques rajoute donc un élément de complexité à la conception de systèmes innovants.

Plusieurs objectifs peuvent donc être posés dans le cadre de recherches sur la conception de systèmes de culture plurispécifiques :

- Développer des connaissances sur le fonctionnement et les dynamiques des systèmes plurispécifiques (Celette et al., 2005 ; Lamanda et al., 2006),
- identifier des critères d'évaluation des systèmes de culture plurispécifiques sur une base agro-environnementale (Loyce et Wery, 2006),
- prendre en compte la composante biotechnique des systèmes de cultures plurispécifiques, notamment les interactions entre les pratiques culturales, en lien avec la composante décisionnelle,
- coordonner des méthodes diverses pour concevoir des systèmes de cultures (enquêtes, expérimentation au champ, expérimentation système, modélisation, ...)

I.1.2.2. Conception de systèmes de culture prairiaux irrigués

Les végétations herbacées représentent 30% des superficies continentales le plus souvent pâturées ou exploitées.

Les systèmes prairiaux présentent plusieurs spécificités par rapport aux systèmes cultivés :

- (i) une forte interaction des prairies avec les systèmes d'élevage au travers des pratiques de défoliation - coupe et pâturage (Cros et al., 2003),
- (ii) les prairies sont rarement implantées dans des conditions de culture (sol, climat) favorables au développement d'autres systèmes de culture primés ou à plus haute valeur ajoutée,
- (iii) une majorité de systèmes prairiaux sont basés sur des prairies permanentes, plurispécifiques et hétérogènes en lien avec la variabilité des ressources et des régimes de défoliation.

Dans une majorité d'études, ces systèmes prairiaux sont étudiés avec le point de vue de l'écologie mettant en avant les notions de plurispécificité et biodiversité (Pervanchon, 2004) ou le point de vue de la zootechnique – les prairies étant avant tout reconnues comme des zones de pâturage (Duru et Hubert, 2003 ; Cros et al., 2003). Les prairies plurispécifiques permanentes sont peu étudiées comme une culture à part entière fertilisée, irriguée, coupée, pâturée.

Dans les années 1960, des études ont fait le lien entre productivité des systèmes prairiaux et irrigation dans un contexte d'intensification de la production mais les connaissances acquises ne permettent pas de répondre aux enjeux actuels de l'agriculture : conciliation des enjeux écologiques et économiques et multifonctionnalité de l'agriculture.

Le changement climatique et les problèmes récurrents d'alimentation en fourrage en année sèche ont rajouté un certain nombre d'objectifs (Brisson et al., 2006) :

- identifier les différences de sensibilité au déficit hydrique des types de végétation prairiale selon les modes d'exploitation,
- vérifier si les changements de végétation consécutifs à une période de sécheresse sont réversibles,
- préciser les seuils de déficit hydrique à partir desquels on observe un impact sur les rendements et la diversité floristique,
- identifier des modes de conduite de l'irrigation des systèmes prairiaux : méthodes de pilotage, indicateurs et seuils,

- Simuler les systèmes prairiaux irrigués notamment les relations sol-plante.

I.1.2.3. Conception de systèmes de culture assistée par modèle

L'approche classique pour concevoir des systèmes de culture est d'expérimenter les systèmes sur le terrain dans une grande diversité de situations agro-écologiques et économiques (Lançon et al., 2007). Cependant cette approche est vite inadaptée pour trier les systèmes : les combinaisons techniques sont nombreuses, les expérimentations longues et coûteuses (Loyce et Wery, 2006). L'expérimentation est souvent complétée par des techniques d'aide à la conception basée sur l'ingénierie assistée par ordinateur. Les modèles de fonctionnement des systèmes de culture permettent d'étudier la dynamique des cultures soumises à différents itinéraires techniques. Ils sont souvent construits comme le couplage d'un module biotechnique et d'un module décisionnel (Duru et Hubert, 2003 ; Keating et al., 2001). Les travaux de recherche assistés par des modèles et ayant abouti à la conception de systèmes de culture irrigués restent peu nombreux à l'échelle du système de culture (Leroy et al., 1997 ; Cros et al., 2003 ; Bergez et al., 2001). La principale raison est la difficulté à prendre en compte d'une part l'ensemble du système de culture et d'autre part la difficulté de couplage entre le module biotechnique et le module décisionnel avec l'accroissement des contraintes à l'échelle de l'exploitation.

La conception de systèmes de culture pose de nombreuses questions de recherche :

- Quelles connaissances sont nécessaires pour représenter les systèmes de culture ?
Comment les organiser dans des modèles conceptuels et numériques ?
- Comment intégrer les échelles dans les modèles ?
- Comment évaluer la qualité prédictive des modèles d'aide à la conception de systèmes de culture ?
- Comment formaliser le système de décision en règles pouvant générer un système technique ?
- Comment délimiter le domaine de validité des modèles ?
- Comment coupler différents modèles notamment modèles biophysique et décisionnels ?

I.2. Problématique de la thèse :

La question posée dans ce travail est celle de la conception de système de culture prairiaux – plurispécifiques, irrigués par gravité et plus économes en eau tout en maintenant la production quantitative et qualitative de foin.

Cette thèse repose sur l'hypothèse selon laquelle il est nécessaire d'analyser et de modéliser le fonctionnement biophysique et la gestion du système prairial irrigué pour élaborer un outil d'aide à la conception de systèmes de culture plus efficaces en termes d'usage de l'eau. Cette hypothèse sera appliquée au cas de la plaine de Crau en prenant en compte la production de foin et les externalités de l'irrigation notamment l'aspect recharge de l'aquifère.

I.3. Déclinaison de la problématique de thèse

I.3.1. Approche systémique du système de culture

L'étude est basée sur une approche systémique du système de culture (Sébillotte, 1990). En suivant la démarche de Rapidel et al. (2006), nous considérons que le système de culture est composé d'un sous-système biophysique sous l'influence d'un sous-système technique résultant lui-même des décisions d'un agriculteur (Figure I.1).

Le sous-système biophysique se décline en trois compartiments en interaction : (i) le compartiment sol dont l'état hydrique évolue au cours de la saison, (ii) le compartiment plante dont la biomasse, l'indice foliaire et la composition floristique varie dans le temps, et (iii) le compartiment lame d'eau sous l'étroite dépendance du système d'irrigation. Ce dernier est spécifique de l'irrigation par gravité, avec une évolution périodique, la lame d'eau n'étant pas présente dans le champ cultivé tout au long de la saison, et avec une dynamique spatiale, la lame d'eau parcourant progressivement toute la parcelle lors de chaque irrigation. Le sous-système biophysique est soumis à son environnement et au sous-système technique.

Le sous-système technique se compose de pratiques spécifiques aux systèmes prairiaux (défoliation) et de pratiques génériques (irrigation) qui sont le plus souvent en interaction du fait de leur raisonnement. Par exemple la date d'irrigation ne peut pas être décidée sans prendre en compte la date prévue de coupe. Ce sous-système technique est sous l'influence du sous-système décisionnel de l'exploitation, les décisions étant prises en fonction de l'état du système biophysique, du système technique et de l'environnement (ressources de

l'exploitation et climat). Enfin, ce système de culture est évalué sur une base multi critère puisqu'il doit concilier performances hydrauliques, agronomiques, économiques au niveau de l'exploitation et préoccupations environnementales.

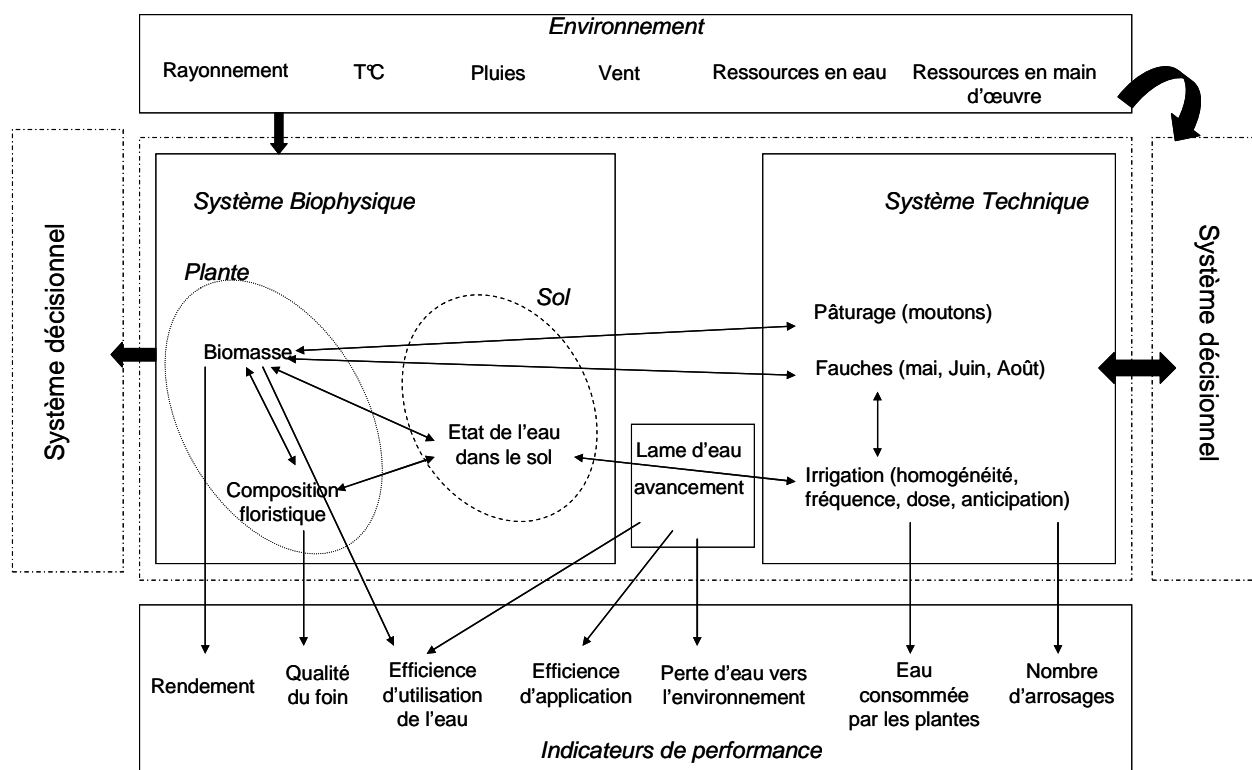


Figure I.1: représentation systémique du système de culture. Le système de culture se décompose en sous-systèmes biophysique et technique, ce dernier étant généré par un système décisionnel l'ensemble étant sous l'influence d'un environnement. Le système de culture est évalué par des critères de performance hydrauliques et agronomiques.

I.3.2. La problématique de thèse déclinée en 4 objectifs scientifiques

A partir de cette approche systémique, la problématique de la thèse est déclinée en quatre objectifs majeurs. Les deux premiers objectifs concernent le sous-système biophysique, les deux suivants le sous-système technique et le système décisionnel :

- Objectif 1 : analyser la réponse de la prairie à un déficit hydrique et le fonctionnement du système biophysique en termes de flux d'eau (chapitre III),
- Objectif 2 : représenter et modéliser le système biophysique avec ses trois composantes sol-plante-lame d'eau (chapitre IV),
- Objectif 3 : analyser le système décisionnel des agriculteurs et la manière dont il détermine le système technique (chapitre V),

- Objectif 4 : représenter conceptuellement les liens entre système décisionnel et système technique afin de pouvoir ultérieurement développer un outil d'aide à la décision basé sur la simulation numérique (chapitre V).

La suite de ce document est organisée en quatre parties : un deuxième chapitre présentant le matériel et les méthodes utilisées, trois chapitres de résultats chacun contribuant à atteindre les objectifs fixés et un chapitre de discussion générale. Chaque chapitre de résultat est organisé autour d'un article scientifique. Une présentation synthétique des articles est proposée avant chaque article reprenant les principaux résultats. La bibliographie est présentée rapidement dans le déroulement de la démarche puis détaillée dans chacun des articles.

I.4. Démarche scientifique

I.4.1. Acquisition de connaissances sur le système biophysique

Pour atteindre l'objectif 1 présenté ci-dessus, nous nous plaçons à l'échelle de la parcelle cultivée (chapitre III).

I.4.1.1. Acquisition de connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé centrées sur l'eau - le peuplement végétal et sur l'adaptation de l'irrigation

La réponse des cultures au déficit hydrique a été décrite par de nombreux auteurs. Les processus physiologiques affectés par un manque d'eau sont, dans l'ordre : la croissance, la résistance stomatique et la transpiration, la photosynthèse puis la translocation (Deng et al., 2004 ; Wery, 2005). Cette réponse dépend de la capacité d'absorption racinaire de l'eau et de la disposition des racines dans le sol (Lelièvre et Desplobins ; 1994 ; Grieu et al., 2001) mais aussi de l'état hydrique du sol et ses effets sur la réponse stomatique et la croissance (Tardieu et Simmoneau, 1998 ; Davies et Hartung ; 2004 ; Pellegrino et al., 2006) ainsi que de la phase du cycle de développement (Bissuel-Belaygue et al., 2002a, 2002b). L'intensité et la durée du déficit hydrique vont aussi influencer la réaction des cultures au manque d'eau (Wery et al., 2005). Deux indicateurs d'état du système biophysique nous permettent d'identifier sa

sensibilité au déficit hydrique du sol : la dynamique de croissance de la biomasse et l'indice foliaire (Wery et al., 2005 ; Rapidel et al., 2006).

Dans le cas de culture plurispécifiques, les relations de compétition pour l'eau entre les différentes espèces peuvent modifier la sensibilité de chaque espèce au déficit hydrique (Lelièvre et Desplobins ; 1994). La qualité du foin produit sur une prairie peut être évaluée par différents indicateurs : indicateurs nutritionnels sous l'angle zootechnique dépendant du débouché du foin mais aussi la composition floristique (Hugues et al., 1952 ; Daget et Poissonnet, 1971). Cette approche écologique de la composition floristique a été privilégiée dans ce travail.

Pour analyser la sensibilité de prairies plurispécifiques au déficit hydrique, nous avons créé des conditions de déficit hydrique contrastées.

L'efficacité d'utilisation de l'eau WUE varie pour une culture donnée en fonction de la dose d'irrigation c'est-à-dire le débit et la durée d'irrigation. Pour augmenter WUE, une stratégie est de réduire les quantités apportées en maintenant les rendements et la composition floristique, en jouant sur les pertes d'eau et l'utilisation de la réserve en eau du sol. Pour une même parcelle irriguée par gravité à la planche (voir chapitre II.), de configuration spatiale et de sol donnés, il est plus facile de modifier les fréquences d'irrigation que les doses. Nous proposons ici de modifier les fréquences d'irrigation pour créer des conditions de déficit hydrique variées. La méthode tensiométrique (Tron et al., 2000) a souvent été proposée pour adapter les fréquences d'irrigation aux besoins en eau des plantes. Cette méthode de pilotage permet de mieux prendre en compte la fourniture en eau du sol et donc de réduire les apports sans perte de rendement (Isbérie, 1992 ; Isbérie et al., 2004). Nous appliquerons la méthode tensiométrique pour réguler indirectement le déficit en eau du sol et gérer l'accessibilité en eau du sol pour la culture (Wery, 2005).

A l'échelle de la parcelle, les questions qui se posent dans cette première étape sont :

- Peut-on économiser de l'eau en jouant sur les fréquences d'irrigation tout en maintenant les rendements et la composition floristique ? Quels impacts sur le WUE et la recharge de la nappe ?
- Quelle sensibilité de la prairie au déficit hydrique en termes de quantité et de qualité de la récolte ?
- Quelle est la dynamique de l'eau dans le sol ?

I.4.1.2. Des questions de connaissances qui renvoient à des questions méthodologiques

Lors de l'acquisition de connaissances sur le système biophysique, nous avons aussi été confrontés à des questions d'ordre méthodologiques qui seront développées dans le chapitre II et III. Les questions posées sont :

- Comment caractériser le déficit hydrique du sol ? Peut-on utiliser pour les prairies plurispécifiques le concept de Fraction d'Eau Transpirable du Sol (FTSW) (Wery, 2005) pour indiquer le niveau de stress hydrique perçu par la plante ?
- Quelle est la pertinence des mesures tensiométriques en sols caillouteux ?
- Comment évaluer le LAI après coupe ?
- Comment évaluer la composition floristique ?

I.4.2. Modélisation du système biophysique pour simuler le fonctionnement du sous-système sol-plante-lame d'eau

Cette deuxième étape est principalement méthodologique est vise à répondre à l'objectif 2 de modélisation de l'ensemble des compartiments du système biophysique considéré : lame d'eau/sol/plante développé par la suite dans le chapitre IV. Nous considérons séparément la modélisation de la lame d'eau et la modélisation de la culture. Le compartiment sol est représenté dans les deux modélisations et assure le couplage.

I.4.2.1. Modélisation de l'irrigation à la planche

L'irrigation gravitaire est décrite comme la résultante de l'avancement de l'eau et de l'infiltration de cette eau (Walker, 1993). Plusieurs équations d'infiltration sont utilisées dans les études d'irrigation gravitaire : L'équation de Kostiakov et Kostiakov-Lewis (Walker, 1993), l'équation de Horton (Mailhol et al., 2005), l'équation de Green-Ampt (Zatarain et al., 2003) ou encore l'équation de Richards (Saucedo et al., 2005). L'avancement est basé sur le modèle de St Venant (Strelkoff et Katapodes, 1977). De nombreux travaux proposent des solutions simplifiées du processus avancement –infiltration. Les méthodes courantes sont la méthode des caractéristiques, l'intégration eulérienne (Walker, 1993), l'approche du zéro d'inertie (Zerihun et al., 2005), l'onde cinématique (Walker et Skogerboe, 1987) ou des

approches basées sur une solution exacte de l'équation de conservation de la masse (Mailhol et Gonzalez, 1993 ; Mailhol et al., 2005). Des comparaisons de ces approches sont proposées dans la littérature (Mishra et al., 2003).

La modélisation de l'irrigation à la planche nécessite donc de choisir comment représenter l'avancement et le phénomène qui lui est étroitement associé, l'infiltration, dans une perspective de couplage avec un modèle de culture.

Plusieurs paramètres importants influent sur l'avancement de l'eau dans la parcelle : hauteur d'eau, débit, pente, perméabilité du sol et rugosité de surface (Walker, 2003). Dans le cas de l'irrigation à la planche sur prairie, la rugosité varie en fonction de la hauteur et de la densité de la culture.

Les questions posées pour la modélisation de l'irrigation à la planche sont au nombre de 4 :

- Quelle modèle d'avancement appliquer ? Notamment quelle solution du modèle de St Venant retenir ?
- Quelle loi d'infiltration choisir étant donné l'importance de la macroporosité des sols et le drainage rapide ?
- Comment évaluer le coefficient de rugosité en fonction de la dynamique de la végétation ?
- Comment coupler le modèle d'irrigation au modèle de culture ?

I.4.2.2. Modélisation d'une prairie plurispécifique et permanente

I.4.2.2.1. Spécificités des prairies plurispécifiques

Les modèles de simulation des prairies sont nombreux dans la littérature (Diaz et al., 2007). Ils utilisent des approches statistiques (Han et al., 2003 ; Pervanchon, 2004) ou dynamiques (Schapendonk et al., 1998 ; Cros et al., 2003 ; Jouven et al., 2006a, 2006b ; Corson et al., 2006 ; Adam et al., 2007). Les différents objectifs présentés dans ces études sont variés, les principaux étant : les modèles d'impact de changements globaux (Diaz et Cabido ; 1997), des pratiques (McIntyre et Lavorel, 2007), les modèles d'optimisation de la gestion des prairies (Jouven et al., 2006a ; Adam et al., 2007) notamment le pâturage (Cros et al., 2003).

Deux possibilités s'offrent à nous pour prendre en compte la plurispécificité des prairies dans un modèle : (i) la stabilité de la végétation dépendant du nombre de groupes fonctionnels, la

plurispécificité est initialisée dans le modèle et son évolution simulée, (ii) la plurispécificité n'est qu'une entrée du modèle pour ajuster des variables de sortie comme la biomasse.

La première approche consiste à simuler chaque espèce séparément puis de simuler deux espèces ensemble qui se concurrencent puis de complexifier en considérant plus d'espèces (Schippers et Joenje, 2002). Cette démarche est intuitivement plus proche des connaissances écophysiologiques mais elle est très lourde à mettre en œuvre. Les connaissances nécessaires sont nombreuses et surtout souvent non disponibles pour les espèces non sélectionnées ou moins étudiées que les graminées (Jouven et al., 2006a). Elle est donc difficile à mettre en œuvre dans des modèles opérationnels en conditions agricoles.

La deuxième approche est illustrée dans l'utilisation du concept des traits fonctionnels (Diaz et Cabido, 1997 ; Lavorel et al., 1997 ; Duru et al., 2004 ; Ansquer et al., 2004) appliqués à la modélisation (Adam et al., 2007). La prairie est considérée comme une culture possédant un ensemble de caractéristiques fonctionnelles (Jouven et al., 2006a, 2006b ; Corson et al., 2006). Dans l'objectif d'un couplage du modèle de culture avec un modèle d'irrigation puis d'un modèle technique, il est nécessaire d'adopter une démarche simplifiée qui ne permet de considérer la prairie que dans sa globalité. Cette approche sera privilégiée dans ce travail. Nous avons choisi d'adapter un modèle existant étant donné le nombre important de modèles présentés dans la littérature.

La question de la nécessité d'intégrer la plurispécificité dans notre modélisation a été soulevée : est-il possible de simuler les rendements d'une prairie plurispécifique à partir d'un modèle générique et monospécifique ? Nous avons adapté dans un premier temps un modèle de culture générique, monospécifique tourné vers des questions de gestion de l'eau (voir Chapitre IV première partie). Cependant, la plurispécificité doit être considérée à la fois dans l'espace et dans le temps. La composition floristique d'une prairie varie en fonction de la saison, certaines espèces étant plus ou moins présentes en fonction notamment de la température (Volaire et Lelièvre, 1992). Ces variations de composition floristique se traduisent par des modifications du potentiel de rendement d'un cycle de croissance à l'autre. La difficulté de rendre compte de ces différents potentiels au cours d'une saison de production ainsi que des spécificités de la prairie (redémarrage de croissance en sortie d'hiver, différenciation des phases végétatives et reproductives), nous a conduits à nous orienter vers un modèle spécifique à la prairie en intégrant un minimum de diversité végétale (voir Chapitre IV deuxième partie).

Les effets des pratiques sur la diversité végétale des prairies ont été très étudiés (Pervanchon, 2004). Il en ressort que les 3 pratiques influençant le plus la diversité végétale sont les régimes de défoliation (définis par le type de défoliation – fauche ou pâture- et la fréquence), l'irrigation et la fertilisation minérale (Pervanchon, 2004). Cet impact sur la composition floristique est important à prendre en compte car la composition floristique va influencer sur les rendements et la qualité du foin. En zones semi-arides, les relations plantes-sol dans les prairies sont dominées par le déficit en eau du sol – ‘belowground dominance’ plus que par l'association eau-azote-lumière en zones tempérées et humides – ‘indeterminate dominance’ (Burke et al., 1998). La ‘belowground dominance’ conduit souvent à une complète occupation du sol par les racines, notamment en sols peu profonds avec des déficits hydriques suffisants pour induire des stress hydriques. Les ressources en azote du sol ne sont que secondaires dans ce type de prairies.

Au vu de ces informations, les questions sur la modélisation des prairies plurispécifiques sont :

- Comment prendre en compte simplement la plurispécificité de prairies irriguées dans l'objectif de concevoir des systèmes de culture prairiaux au travers de son impact sur les rendements ?
- Quel modèle de prairie utiliser dans ce travail ?
- Peut-on simuler la dynamique de croissance d'une prairie sans intégrer de module azote ?
- Comment représenter le lien entre déficit hydrique du sol et stress hydrique ? Comment représenter le statut hydrique du sol ?

I.4.2.2.2. Adaptation d'un modèle de culture au cas de la prairie de Crau

La plupart des modèles de culture sont des modèles dynamiques (Brisson et Wery, 2002 ; Brisson et al., 2006b) dont le nombre de paramètres est relativement élevé en regard des valeurs mesurées au champ (Wallach et al., 2006). L'adaptation d'un modèle inclut trois étapes : l'estimation des paramètres, l'évaluation du modèle et l'analyse de sensibilité. L'estimation des paramètres consiste en l'obtention des valeurs des paramètres à partir de données expérimentales. L'évaluation de la valeur prédictive du modèle correspond à l'évaluation de la valeur du modèle au regard de son utilisation. L'analyse de sensibilité

(Ruget et al., 2002) permet d'évaluer comment les réponses du modèle évoluent lorsque la valeur des entrées est modifiée (Wallach et al., 2006). Les méthodes d'essai-erreur régulièrement utilisées montrent vite leurs limites dans ces trois étapes. Les erreurs d'évaluation des paramètres s'additionnent avec les erreurs liées à la structure interne du modèle et peuvent aboutir à des résultats éloignés des valeurs observées (Wallach et al., 2001). La mise au point de méthodes rigoureuses et automatiques pour l'estimation des paramètres (Tremblay et Wallach, 2004) et l'analyse des erreurs améliore considérablement le processus d'évaluation des erreurs et de la valeur prédictive des modèles (Wallach et al., 2006). Relativement peu de travaux proposent ce type d'approche rigoureuse (Wallach et al., 2001 ; Tremblay et Wallach, 2004). La procédure automatique permet d'assurer que le paramétrage est toujours réalisé de la même manière. L'adaptation d'un modèle de culture doit ensuite être complétée par une analyse de sensibilité (Wallach et al., 2006).

Les questions qui sont soulevées ici sont :

- Quels paramètres estimer ? Comment les choisir ?
- Quel critère d'estimation des paramètres utiliser pour estimer les paramètres ?
- Comment améliorer le modèle sans multiplier les paramètres ?
- Comment évaluer la valeur prédictive ?

I.4.3. Acquisition de connaissances sur le système décisionnel des agriculteurs et des déterminants du système technique

Cette troisième étape nous permet d'aborder l'objectif 3 de ce travail de recherche. Alors que les deux premières étapes se référaient à l'échelle parcellaire, l'acquisition de connaissances sur le sous-système technique déterminé par le système décisionnel (chapitre V) renvoie à des échelles supérieures : l'exploitation agricole.

La notion de système de culture (Sebillotte, 1990) renvoie à la notion d'itinéraire technique (Sebillotte, 1974 ; 1978). Il n'est pas possible de parler de performances du système de culture sans y adjoindre un ou plusieurs objectifs de production ainsi que des moyens de production qui agissent sur le champ cultivé pour atteindre ces objectifs (Dore et al., 2006). Un objectif de production ne peut être atteint qu'en considérant la combinaison logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle', c'est-à-dire l'itinéraire technique (Sebillotte,

1974 ; 1978), qui fonde la cohérence interne du système technique. Cependant, la mise en œuvre des techniques n'est pas simple : (i) les pratiques interagissent entre elles, (ii) les effets des pratiques sur les performances agronomiques sont difficiles à prévoir du fait de la complexité du fonctionnement du système biophysique (Figure I.1). La notion d'itinéraire technique renvoie à des objectifs de production et à des logiques d'actions individuelles (Sebillotte et Soler, 1990 ; Aubry et al., 1998a ; 1998b) et à différents niveaux d'échelles de décision (Papy 2001; Papy et Baudry, 2005; Capillon et Caneill, 1987).

Le recueil des informations nécessaires pour décrire les logiques d'action et les déterminants du système technique se fait généralement par enquêtes en exploitation (Girard et al., 2001 ; Dounias et al., 2002), mais il peut aussi faire appel à des connaissances expertes (Duru et Hubert, 2003). L'utilisation de schémas conceptuels d'organisation du fonctionnement de l'exploitation agricole (Aubry et al. 1998a) facilite la mise en forme de ces informations et le passage ultérieur à la modélisation numérique.

Les questions soulevées pour répondre au troisième objectif sont :

- Comment construire une méthodologie d'enquête adaptée à nos objectifs et au contexte local ?
- Quelles sont les interactions entre le système de culture et le système d'élevage ?
- Quels sont les composants essentiels du système de culture ? Comment sont-ils organisés dans le temps et dans l'espace ?
- A quelles échelles se prennent les décisions sur chacun des actes techniques ?
- Quelles interactions entre les techniques et comment influencent-elles le système biophysique ?
- Quelles sont les logiques de gestion de l'irrigation par l'agriculteur ? Quelles sont les contraintes majeures imposées par le système collectif de distribution de l'eau ?
- Quelles marges de manœuvre l'agriculteur a-t-il dans la gestion de son système technique ?

I.4.4. Modélisation du système décisionnel des agriculteurs

Cette quatrième et dernière étape est positionnée à l'échelle de l'exploitation agricole. Elle est abordée dans le chapitre V à la suite de l'acquisition de connaissances sur les sous-systèmes décisionnel et technique.

Plusieurs études ont présenté l'organisation des agriculteurs sous la forme du 'modèle d'action' (Cerf et Sebillotte, 1988; Cerf, 1996 ; Aubry et al., 1998a) qui est décrit comme une organisation spatiale associée à une organisation temporelle planifiées. Ce concept a été appliqué dans le cas de l'étude des assolements (Maxime et al., 1995), de la gestion des ressources travail (Papy et al., 1988 ; Attonaty et al., 1993) ou en eau (Leroy et al., 1997 ; Labbe et al., 2000; Bergez et al., 2001 ; Debaeke et al.; 2006). Le modèle d'action permet une modélisation conceptuelle du système décisionnel pouvant déboucher sur des modélisations informatisées plus formelles de ces processus décisionnels afin de pouvoir simuler la structure du système technique (Figure I.1). Les difficultés rencontrées résident (i) dans la traduction à l'échelle de la parcelle de contraintes exprimées à des échelles supérieures et (ii) dans la formalisation des règles de décision (Dore et al., 2006). Plusieurs auteurs ont proposé de formaliser les règles de décision sous la forme d'une condition booléenne : « SI <Indicateur><opérateur><seuil ALORS <Action1> SINON <Action2> (Aubry et al., 1998; Bergez et Garcia, 2004). Dans ce cas, la règle de décision est vue comme une fonction associant une variable d'état du système et une action à réaliser. Cette variable d'état peut caractériser le système biophysique ou le système technique. Le modèle de décision est alors composé d'une suite de règles de décision élémentaires qui peuvent être classées en quatre grands types de règles : les règles de séquençage des pratiques, les règles d'activation d'une action, les règles d'arbitrage, les règles de tri et regroupement.

Les questions identifiées pour atteindre l'objectif 4 sont:

- Comment adapter le concept du modèle d'action à l'irrigation des prairies ?
- Quelles sont les principales décisions du système décisionnel ? Comment s'organise les décisions dans notre cas d'étude ?
- Quelles sont les différentes échelles de décisions importantes pour conceptualiser le système décisionnel de système de culture prairiaux irrigués ?

Ce premier chapitre nous a permis de définir le contexte scientifique de cette thèse, d'en dégager une problématique puis de construire à partir de cette problématique et de la littérature une démarche scientifique en quatre étapes. Seules les principales références bibliographiques ont été présentées ici. Une bibliographie plus détaillée est proposée dans les chapitres de résultats avec les articles.

CHAPITRE II

MATERIEL ET METHODES

II. MATERIEL ET METHODE

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord la pratique de l'irrigation gravitaire et ses spécificités, puis le terrain d'étude afin de montrer en quoi ce terrain est un bon support pour répondre aux questions posées. Nous présentons enfin les expérimentations et méthodes mises en œuvre pour répondre aux quatre objectifs posés dans le chapitre précédent.

II.1. Pratiques de l'irrigation gravitaire par submersion et ruissellement

L'irrigation à la planche est une technique d'arrosage dans laquelle la répartition de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre (irrigation de surface), par écoulement à la surface du sol sous l'effet de la pente et des propriétés du sol (irrigation par gravité). L'eau est distribuée par des canaux dits d'amenée. Les canaux sont bouchés à leur extrémité et se remplissent progressivement. L'eau ruissèle ensuite sur la planche d'irrigation, la submerge et s'y infiltre. L'arrosage se décompose en quatre grandes phases (Tiercelin, 2007) :

- l'avancement : cette phase démarre dès l'instant où l'eau commence à s'écouler dans la planche et se termine lorsque l'eau atteint l'extrémité aval de la planche ou une certaine proportion fixée de la longueur de la planche,
- l'entretien : il dure du moment où l'eau a atteint l'extrémité aval de la planche jusqu'à la coupure de l'alimentation en eau,
- la déplétion : cette phase dure jusqu'au moment où l'eau commence à disparaître en amont de la planche,
- la récession : elle commence à la fin de la récession jusqu'au moment où l'eau disparaît en aval de la planche.

Cette technique pose le problème de la maîtrise des débits, de la dose d'eau apportée et des faibles efficacités d'application (Burt et al., 1997 ; Clemmens et Burt, 1997). L'irrigation est programmée pour recharger la réserve en eau du sol en totalité cependant la répartition en eau est très irrégulière avec cette technique.

II.2. La plaine de Crau : un terrain d'étude exemplaire pour la multifonctionnalité de l'agriculture irriguée

La Crau est une plaine triangulaire de 642 km² située dans le sud de la France (Bouches-du-Rhône). Elle est délimitée par les villes d'Arles à l'ouest, de Salon de Provence à l'est et de Fos-sur-Mer au sud (Figure II.1). « Le terme 'Crau' correspond à une dénomination biogéographique : il s'applique à un espace occupé par une steppe herbeuse sans arbre, le coussoul, qui s'est développée sur un sol caillouteux sous climat méditerranéen ; ce sol provient d'un dépôt de galets laissés par un cours d'eau et cimentés par les limons » (Allain, 1998) (Annexe 1).



Figure II.1 : La plaine de Crau s'étend entre Arles, Fos et Salon de Provence, ces limites étant très voisines de celles de la nappe superficielle de Crau.

II.2.1. Un climat de type méditerranéen fréquemment soumis à des vents violents

II.2.1.1. Le climat de la plaine de Crau

Le territoire de la Crau est soumis à un climat de type méditerranéen caractérisé par une alternance entre des étés chauds et secs et une saison tempérée entrecoupée de vagues de froid. Les précipitations sont irrégulièrement réparties sur l'année avec une saison de fortes pluies entre septembre et novembre.

L'insolation : On relève une insolation moyenne de 2700 - 3000 heures par an, ce qui nous place dans les valeurs hautes observées en zone méditerranéenne française.

Les températures : Le climat méditerranéen se caractérise par des hivers doux avec des températures moyennes comprises entre 5 et 10°C (Figure II.2). Cependant des vagues de froids sont recensées chaque année avec des températures se rapprochant de zéro et donc des périodes de gelées. Les intersaisons sont peu marquées. La moyenne estivale est de 23 - 25°C.

Les précipitations dans la région de la Crau sont relativement variables d'une année sur l'autre. La pluviométrie annuelle est en moyenne de 600 mm par an mais elle a varié de 350 à 800 mm par an au cours des 15 dernières années. Les événements pluvieux sont pour une grande partie des orages regroupés sur les mois d'automne (Figure II.2).

Le vent : Le vent est un élément essentiel de la plaine de Crau, quasi culturel. Le mistral, vent du nord – nord-ouest, asséchant, souffle en moyenne 110 jours par an à une vitesse moyenne de 60 km/h et souvent à plus de 100 km/h. Ces jours de vent sont régulièrement répartis tout au long de l'année. La plaine de Crau est une des régions les plus ventée de France, ce qui augmente la demande climatique et limite les possibilités d'irrigation par aspersion.

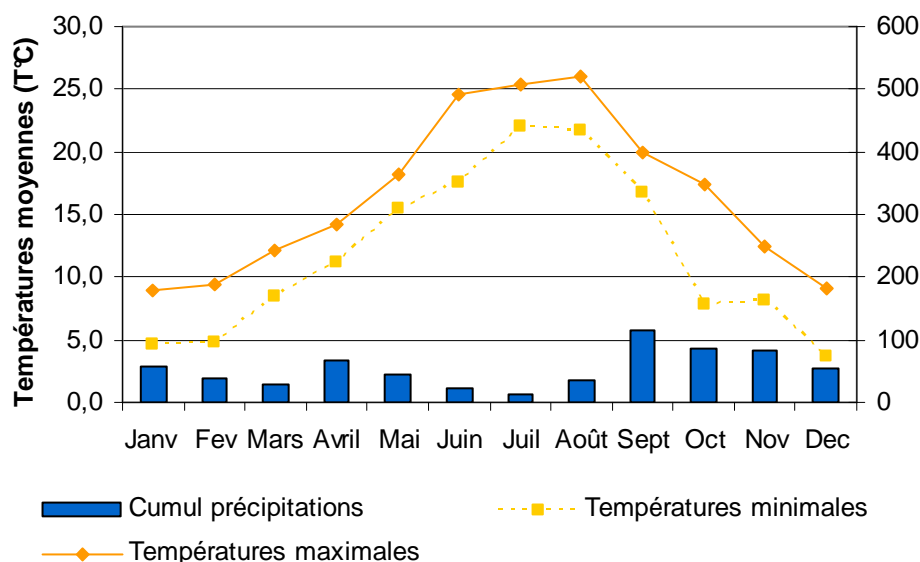


Figure II.2 : Climat moyen entre 1993 et 2003 en plaine de Crau – Données Domaine du Merle – Salon de Provence. Cumul moyen mensuel des précipitations et les moyennes mensuelles de température maximales et minimales.

II.2.1.2. Le climat des années d'expérimentation (Source : Domaine expérimental du Merle)

Année 2004 (Figure II.3): L'année 2004 a été l'année 'la plus proche' du climat moyen de la région, avec toutefois relativement peu de jours de vent et des températures de mars à septembre un peu plus fraîches que la moyenne. L'année a été relativement ensoleillée et les précipitations relevées plus faibles que la moyenne, ce qui a induit un fort niveau de déficit hydrique climatique.

Année 2005 (Figure II.3) : L'année 2005 a été marquée par un niveau de déficit climatique le plus élevé depuis 1993. Les températures relevées n'ont pas été particulièrement élevées de mars à septembre par contre l'année 2005 a été très ensoleillée, avec peu de pluies et beaucoup de vent en période de forts besoins en eau des cultures. La sortie de l'hiver 2004-2005 a été très froide et sèche.

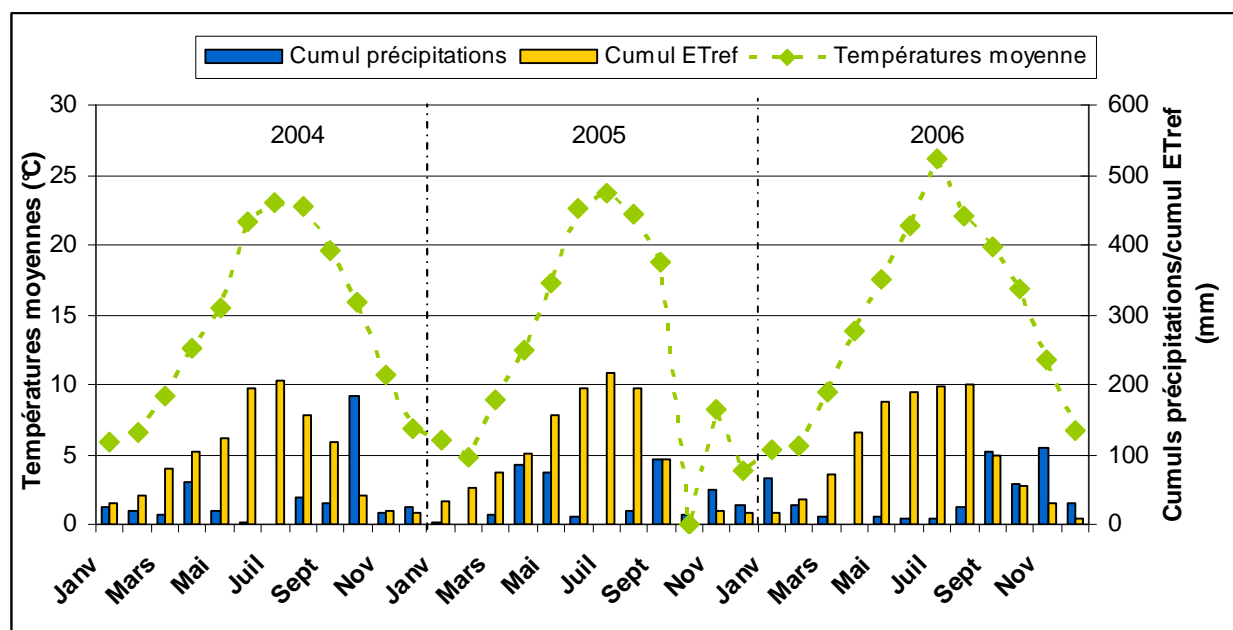


Figure II.3. Evolution des conditions climatiques en plaine de Crau sur la période 2004 à 2006 - station météorologique du Domaine du Merle. Moyennes mensuelles des températures (courbe) et cumuls mensuels des précipitations et de l'Etref (barres).

Année 2006 (Figure II.3) : L'année 2006 a été marquée par un déficit de pluviométrie en sortie d'hiver, au démarrage de la végétation, qui s'est accompagné d'une douceur des températures. Cette douceur s'est maintenue jusqu'à la fin du printemps avec des demandes

climatiques journalières (Etreff) supérieures aux normales. Enfin il faut signaler que du début de l'été jusqu'au début août, les températures ont été très supérieures aux normales de saison.

II.2.2. Les sols de Crau

La plaine de Crau correspond à l'ancien delta caillouteux de la Durance, celle-ci ayant vu son cours déplacé jusqu'au Rhône plus au nord il y a 12000 ans. Le sol repose sur une roche mère imperméable, indurée mais altérée et fissurée par endroits. Cette roche mère se compose d'un poudingue calcaire correspondant au cimentage calcaire des cailloutis du delta. La profondeur de ce poudingue très dur varie énormément : il affleure dans certaines parcelles et se situe à un mètre de profondeur dans d'autres.

La roche mère est surmontée d'un horizon de sol (Figure II.4) provenant de la dégradation de ce poudingue (sols fersialitiques calciques avec encroûtement calcaire très induré ; FAO, 1981). Cet horizon affiche un taux de cailloux de près de 90% à la limite du poudingue et de 20% en limite supérieure. Il est recouvert d'une couche de surface limoneuse d'origine anthropique. Dans le cas des sols des prairies, cette couche de sol est surmontée d'un horizon de surface limoneux d'origine anthropique. En effet, l'irrigation a entraîné des modifications des profils initiaux de la zone non irriguée par l'apport de limons qui se sont colmatés dans l'horizon de surface. Cette couche de limons est d'autant plus importante que l'âge de la prairie est élevé (Andrieux, 1981). Elle atteint plusieurs dizaines de centimètres dans les prairies centenaires. Le taux de cailloux est plus bas (5 à 10%) dans cet horizon (Annexe 1).

L'hétérogénéité du sol est importante au sein même d'une parcelle du fait de la variabilité originelle de la profondeur du poudingue ainsi que des apports d'eau qui contribuent avec les racines à la dégradation de l'horizon induré (Andrieux, 1981).

Le sol étant bien aéré, l'enracinement est sain sur l'ensemble du profil (Figure II.4) et les racines de légumineuses sont bien nodulées, Les racines sont très abondantes en surface et descendent ensuite jusqu'au poudingue où elles se retrouvent bloquées (Annexe 1).

La réserve utile du sol varie sur l'ensemble de la plaine de Crau en fonction de la profondeur du poudingue. Elle a été évaluée à 70 mm par mesures à la sonde à neutrons pour un horizon induré à 60 cm de profondeur. La capacité de rétention du sol diminue régulièrement de la surface jusqu'au poudingue du fait de l'augmentation du taux de cailloux.

Ce sol est aussi caractérisé par la bonne pénétration de l'eau qui est à mettre en relation avec le taux de cailloux élevé et les fissurations du poudingue. Cette infiltration est telle que la

plaine de Crau est dépourvue de réseau hydrographique superficiel naturel. Seules quelques ressources en eau d'appoint ont été recensées sur les flancs des Alpilles.

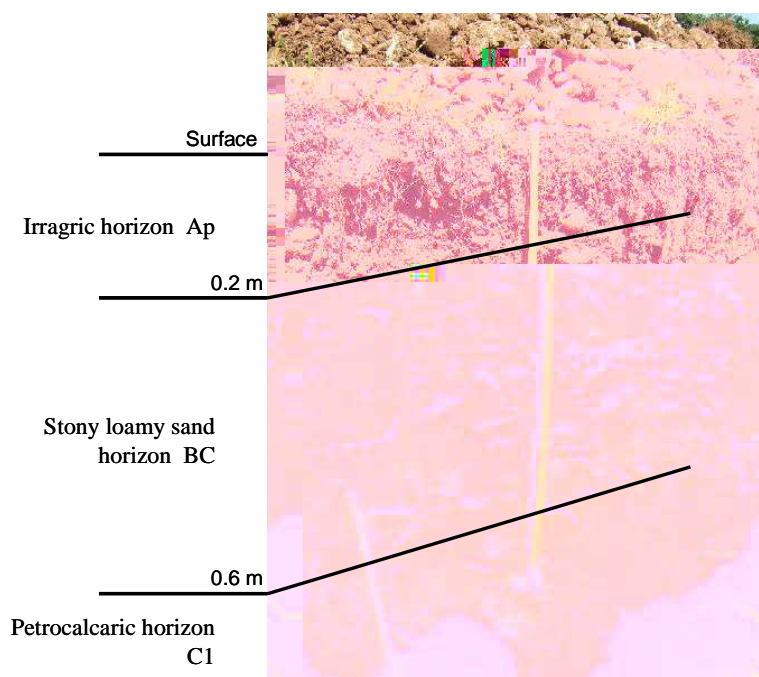


Figure II.4 : Profil de sol de Crau sur la parcelle A, planche T

II.2.3. La nappe superficielle de Crau

La ressource en eau principale en Crau est la nappe superficielle de Crau. C'est une nappe d'eau libre, peu profonde, située dans des cailloutis perméables, qui s'écoule de façon continue du nord-est au sud-ouest. Elle se situe entre 20 m de profondeur au nord-est de la Crau et affleure quasiment au sud-ouest de la Crau où elle est en relation avec la mer méditerranée. Cette nappe est stratégique dans le bassin puisqu'elle assure l'alimentation en eau potable de plus de 270 000 habitants et l'approvisionnement en eau industrielle du complexe pétrochimique de Fos en aval (Comite du foin de Crau, 2003 ; 2004). La recharge de la nappe est assurée à plus de 50% par les eaux d'irrigation des prairies empêchant l'entrée du biseau salé depuis la mer méditerranée. La période de hautes eaux de la nappe coïncide en effet avec la fin de la période d'irrigation en septembre (Figure II.5).

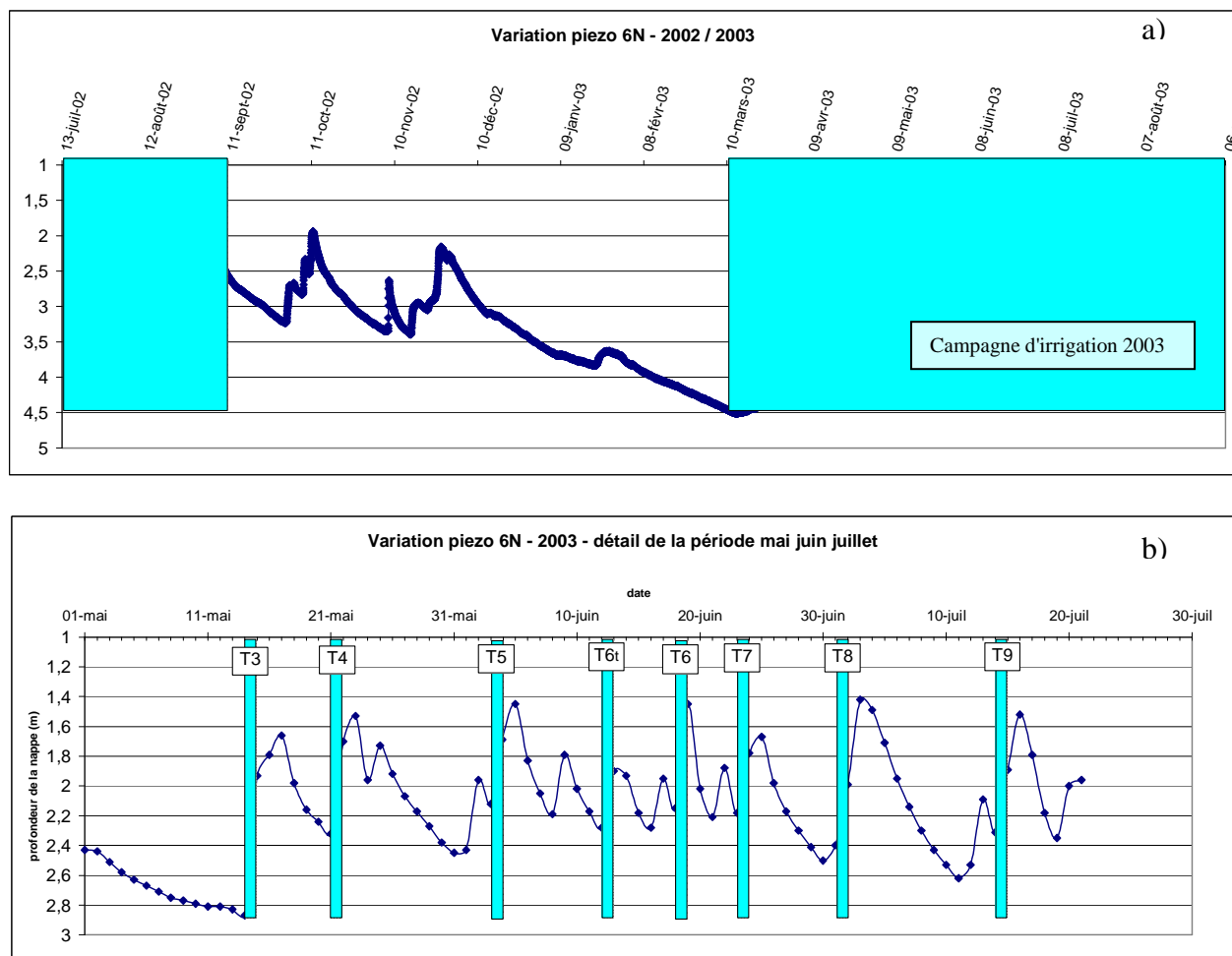


Figure II.5 : Variations (en m) du niveau de la nappe de Crau au bas de la parcelle B au cours de l'année 2002-2003 (a). La nappe atteint son plus haut niveau en période d'irrigation. Zoom sur la saison d'irrigation (b), après chaque irrigation T3 à T9, le niveau de la nappe augmente de plus d'un mètre avant de redescendre à l'équilibre. (Source étude sur la quantification des flux d'eau – IRD, 2002-2004).

II.2.4. Les prairies plurispécifiques de la plaine de Crau

Les prairies de Crau se sont développées sur les 'coussouls' (zone steppique de Crau sèche) à partir du XVIème siècle. Aujourd'hui elles représentent près de 12 500 ha dédiés à la production de foin (Comité du foin de Crau, 2003 ; 2004).

La spécificité du mode d'exploitation (prairie permanente, irrigations par submersion) et la typicité du produit (composition floristique et son évolution au cours de l'année) ont permis l'obtention d'une Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) pour le foin de Crau. Il est considéré comme un foin de luxe, la première coupe riche en graminées, étant notamment vendue dans tous les haras du monde (Emirats Arabes, Japon,...).

Des prairies permanentes dont la surface totale est relativement stable : Compte-tenu de la charge en cailloux des sols de Crau, le retournement des prairies n'est pas possible. Les prairies de Crau sont donc des prairies permanentes en équilibre. Certaines ont été implantées il y a plus d'un siècle, d'autres sont plus récentes. Des réensemencements sont actuellement pratiqués mais ils s'expliquent par des nivellements et re-surfaçages pour améliorer l'écoulement de l'eau dans les parcelles. Les surfaces en prairie sont donc relativement stables depuis 20 ans (Comité du foin de Crau, Communication personnelle).

Des prairies multi-spécifiques : Les prairies de foin de Crau sont caractérisées par une flore spécifique. Les espèces présentes (Tableau II.1) ont permis le rattachement des prairies à une association végétale d'intérêt communautaire⁵. Une trentaine d'espèces ont été recensées dans les prairies mais une dizaine d'espèces sont vraiment abondantes. (Hugues et al., 1952 ; Bretez, 1983).

La proportion en biomasse de ces espèces varie au cours de la saison de production, de la 1^{ère} à la 3^{ème} coupe. En particulier, les graminées majoritaires seront surtout présentes en 1^{ère} coupe (60-65%) et diminueront ensuite, tandis que les légumineuses et les espèces diverses seront de plus en plus présentes de la 1^{ère} (35 - 40%) vers la 3^{ème} coupe (55%) (Hugues et al., 1952). A l'extrême, certaines espèces comme la sétaire ne sont présentes qu'en 3^{ème} coupe.

	Graminées	Légumineuses	Espèces diverses
<i>Espèces très fréquentes et dominantes</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i> L. ^{1,2,3} <i>Dactylis glomerata</i> L. ^{1,2,3} <i>Lolium perenne</i> L. ^{1,2,3} <i>Poa pratensis</i> L. ¹	<i>Trifolium pratense</i> L. ^{1,2,3} <i>Trifolium repens</i> L. ^{1,2,3} <i>Lotus corniculatus</i> L. ^{1,2,3}	<i>Taraxacum officinale</i> Weber ^{1,2,3} <i>Plantago lanceolata</i> L. ^{1,2,3}
<i>Espèces courantes</i>	<i>Festuca pratensis</i> L. ^{1,2,3} <i>Holcus lanatus</i> L. ^{1,2,3} <i>Setaria glaucus</i> L. ³	<i>Medicago lupulina</i> L. ^{1,2,3} <i>Vicia cracca</i> L. ^{1,2,3} <i>Medicago Sativa</i> L. ^{1,2,3}	<i>Tragopogon pratensis</i> L. ^{2,3} <i>Achillea millefolium</i> L. ^{2,3} <i>Daucus carota</i> L. ^{2,3} <i>Galium mollugo</i> L. ^{2,3} <i>Galium verum</i> L. ^{2,3} <i>Pastanica silvestris</i> L. ³

Les numéros à côté des noms d'espèces indiquent à quelle période sont présentes les espèces : le 1 correspond au premier cycle de croissance, le 2 et le 3 respectivement aux deuxième et troisième cycles de croissance.

Tableau II.1 : Les différentes espèces du foin de Crau

⁵ *Espèces d'intérêt communautaire* : Espèces en danger ou vulnérables ou rares ou endémiques (c'est à dire propres à un territoire bien délimité) énumérées à l'annexe II de la directive 92-43 / CEE du Conseil du 21 mai 1992 et pour lesquelles doivent être désignées des Zones Spéciales de Conservation.

Déroulement des coupes (Annexe 2) : La saison de production se déroule en 3 coupes : la première au mois de mai (rendement de 4-4,5T/ha), la deuxième début juillet (3-3,5 T/ha) et la troisième fin Aout (1-1,5T/ha). Chaque coupe se déroule de la même façon à savoir qu'elle intervient toujours au même stade phénologique : après épiaison des graminées, lorsque les fleurs de *Trifolium repens* L. commencent à passer et que les épis de *Arrhenatherum elatius* L. commencent à dorer (les épis de *Lolium perenne* L. étant déjà en dessèchement). En première coupe, toutes les graminées présentes épient (*Poa pratensis* L. en premier lieu, puis *Dactylis glomerata* L.; *Festuca pratensis* L., *Arrhenatherum elatius* L. et enfin *Holcus lanatus* L. et *Lolium perenne* L.) – les talles reproductrices atteignent facilement 1,20 m de hauteur. En deuxième coupe et troisième coupe, ces mêmes espèces, excepté le pâturin, épient et les tiges atteignent respectivement 1 m et 0,80 m de hauteur.

Conduite technique : L'itinéraire technique est fortement cadré par le décret AOC, notamment pour la fertilisation, l'irrigation, la récolte et le stockage. Les prairies reçoivent très peu d'azote minéral, le décret limitant les apports à 60 Kg N minéral/ha/an. Dans la majorité des exploitations, les apports d'azote se font sous forme organique, à travers le pâturage en hiver ou des apports de fumier. Des apports de P et K sont réalisés régulièrement chaque année. Les prairies sont irriguées par submersion tous les 10j environ de mars à octobre. La réserve en eau du sol est rechargée à chaque arrosage.

La récolte est réalisée en 4 étapes : coupe, fanage, andainage et mise en bottes. Les conditions climatiques particulières de la zone – vent et ensoleillement – permettent de récolter le foin rapidement en préservant ses qualités nutritionnelles.

II.2.5. L'agriculture en Crau et les exploitations agricoles productrices de foin AOC

Zonation de la Crau prairiale : Comme nous l'avons vu, la Crau est un territoire coincé au sud du massif des Alpilles, à l'est du Rhône, à l'ouest de l'étang de Berre et au nord de la mer méditerranée. Plusieurs zones peuvent y être délimitées (Figure II.6), elles sont basées sur des caractéristiques pédoclimatiques et sur les conditions de la distribution de l'eau :

- La Crau de Salon : C'est une zone où l'eau est la moins chère (à proximité du canal EDF),

- La Crau d'Eyguières (sud d'Eyguières) : les exploitations sont situées à proximité du canal EDF, avec des parcelles souvent d'un seul tenant,
- La Haute-Crau (nord du Canal de Craponne), est de Saint Martin de Crau et la Crau d'Aureille : Les prairies y sont jeunes (moins de 50 ans) avec peu de limons, des terrains filtrants, une eau chère et des débits d'irrigation faibles,
- La Crau du sud Raphèle-Moulès jusqu'à Saint Martin de Crau : les prairies y sont anciennes avec une couche de limons conséquente et un parcellaire morcelé,
- La Crau d'Entressen : identique à la Crau de Eyguières mais l'eau a souvent deux origines dans les exploitations (le canal et les pompes) et les canaux sont éloignés du canal principal de distribution,
- La Crau d'Istres : identique à la Crau de Salon mais les fréquences d'irrigation y sont plus élevées,
- La Crau de Mas Thibert: cette zone est avant tout représentée par des marais et des résurgences de la nappe de Crau. L'alimentation en eau se fait principalement par des pompes aux niveaux des résurgences.

L'analyse des données du RGA 2000 met en évidence une diminution des surfaces en prairie dans les zones périurbaines liées à l'extension des villes de Crau (Figure II.7). Ce phénomène est tout particulièrement fort dans le sud-est de la Crau (Crau de Salon, Crau d'Entressen, Crau d'Istres). Les zones d'Entressen et d'Istres ne représentent d'ailleurs que 10 à 15% de la surface totale en prairie de la Crau. De même, le secteur de Mas Thibert est particulier car il présente un approvisionnement en eau différent du reste de la Crau et ne participe que très peu à la recharge de la nappe.

Ainsi, la production de foin de Crau irriguée est concentrée dans 3 secteurs (Figure II.6):

- la Crau d'Eyguières (secteur A),
- la Crau de Raphèle (secteur B),
- la Haute-Crau.

Dans le secteur de la Haute-Crau, le RGA 2000 montre que les surfaces en prairies ont diminué depuis dix ans au profit de l'arboriculture (oliviers, pêchers) ou du maraîchage. Dans les secteurs de Raphèle et d'Eyguières, les surfaces en prairie sont relativement stables voire

même en légère augmentation. La majorité de la production de foin de Crau est réalisée dans ces deux secteurs.

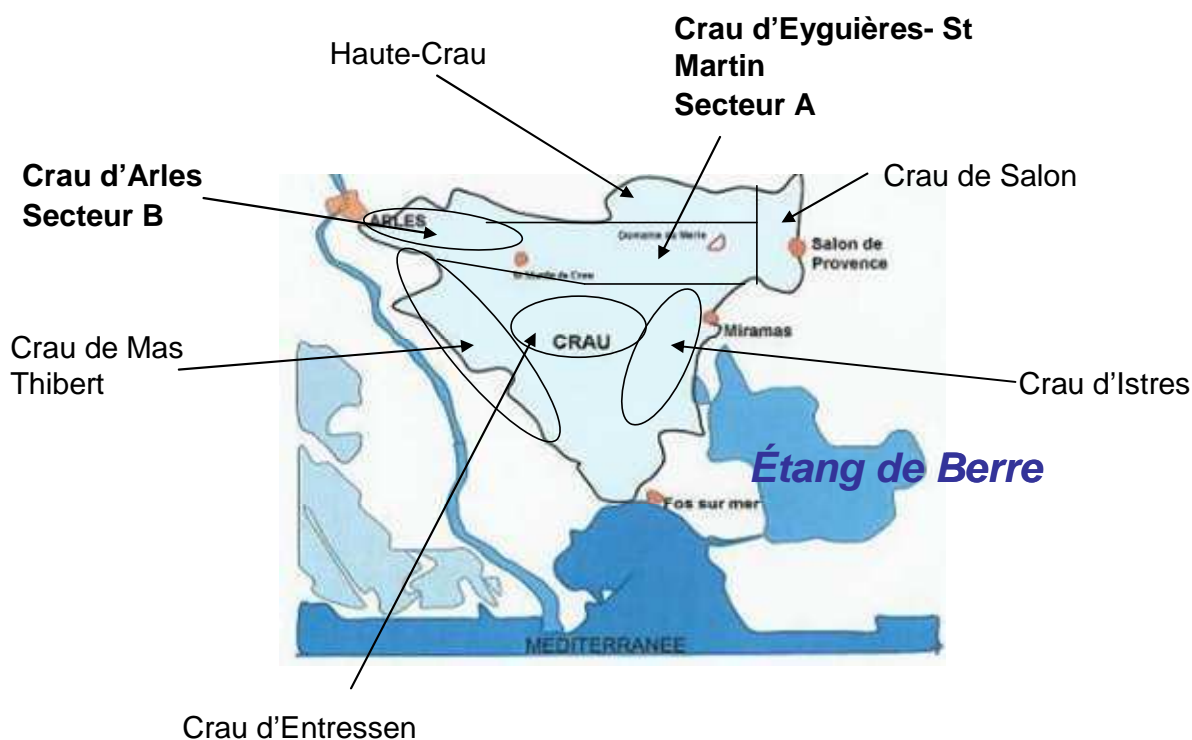


Figure II.6 : Zonage de la Crau retenu comme première base de stratification du territoire. 7 secteurs ont été retenus sur l'ensemble de la plaine. Seuls les secteurs A et B ont ensuite été enquêtés.

Exploitations agricoles produisant du foin : le comité du foin de Crau recense 440 « exploitations ». Les unités agricoles de moins de 20 ha de foin représentent 61% de l'ensemble des exploitants de prairies, ce qui traduit en termes de surface constitue 21% de la surface totale en prairie de foin (Tableau II.2). Cependant 41% de ces exploitants sont des retraités ou des pluriactifs ayant hérité de terres. Ainsi, en réalité, 280 exploitations professionnelles productrices de foin ont été identifiées pour une superficie moyenne de 43 ha (Figure II.8). La majorité des surfaces en foin de Crau sont associées à des exploitations agricoles de SAU en prairie comprises entre 20 et 60 ha ou entre 100 et 200 ha (Figure II.9).

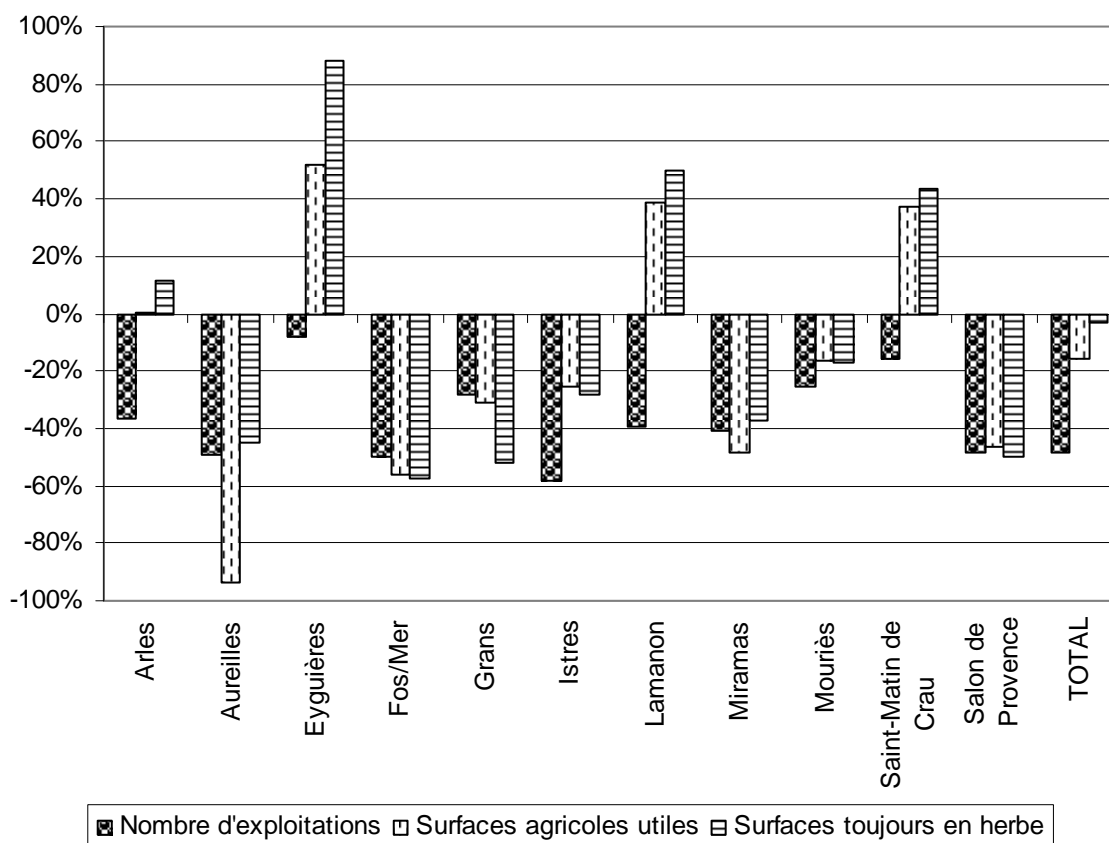


Figure II.7 : Evolution des exploitations agricoles et de la prairie en Crau entre 1988 et 2000. Evolution du nombre d'exploitations, de la surface agricole utile et des surfaces toujours en herbe dans l'ensemble des communes de Crau. . Source RGA 2000 (Djouabi, 2004).

SAU foin	Nombre d'exploitations	% d'exploitations	% de la surface en foin totale représentée
0-20ha	269 (159)*	61% (25%)	21%
20-40ha	83	19%	21%
40-100ha	74	17%	35%
>100ha	16	4%	22%

* Chiffre total intégrant à fois les retraités et pluriactifs (soit 159 personnes représentant la moitié des 0-20ha)

Tableau II.2 : part des exploitations de taille 0-20 ha, 20-40 ha, 40-100 ha et supérieure à 100 ha en nombre d'exploitations, pourcentage d'exploitations et % de la surface en prairie représentée. Source : Communication du Comité du foin de Crau.

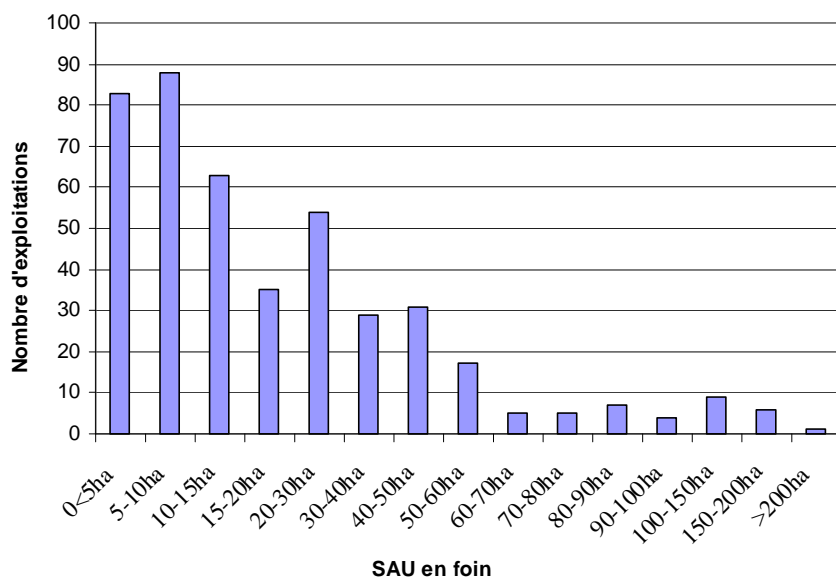


Figure II.8. Répartition des exploitations agricoles de Crau par classe de surface en prairie.
Source : Communication du Comité du foin de Crau.

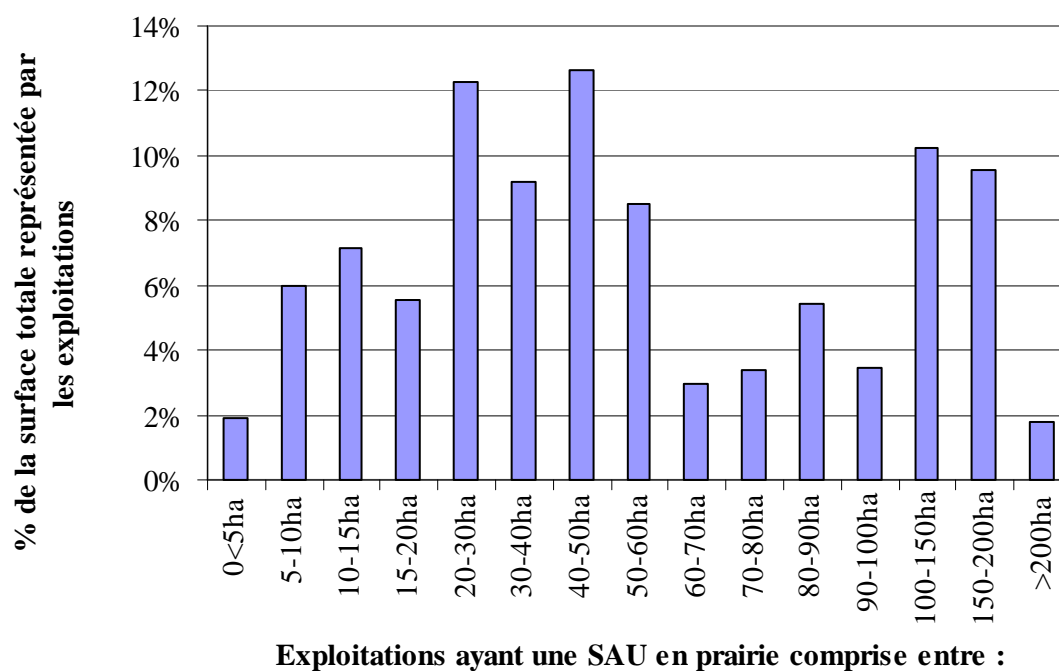


Figure II.9 : % de la surface totale en prairie représentée par les différentes classes d'exploitations. Les exploitations sont classées par rapport à leurs surfaces de prairies.
Source : Communication du Comité du foin de Crau.

Systèmes de production associés au système de production foin : 4 types d'exploitations agricoles produisant du foin de Crau sont régulièrement citées en Crau (Djouabi, 2004).

- Les producteurs de foin en monoculture (environ 55% des exploitations ; Comité du foin de Crau, communication personnelle),

- Les producteurs de foin et éleveurs (environ 37% des exploitations, ce pourcentage étant en augmentation ; Comité du foin de Crau, communication personnelle),
- Le restant : les producteurs de foin et arboriculteurs ou céréaliculteurs, maraîchers.

Dans les exploitations de Crau, l'oléiculture est considérée plus comme un complément de revenu que comme un système de production à part entière. Le maraîchage est essentiellement pratiqué dans les zones périurbaines et constitue souvent le système de production principal de l'exploitation (surfaces en prairies souvent inférieures à 20 ha). Enfin, les céréales sont semées pour valoriser les terres mais ne sont pas irriguées, les rendements sont tout particulièrement bas et le produit est assuré par les primes PAC (Comité du foin de Crau, communication personnelle).

La production de foin est donc avant tout assurée par des agriculteurs en monoculture de foin ou des producteurs de foin-éleveurs.

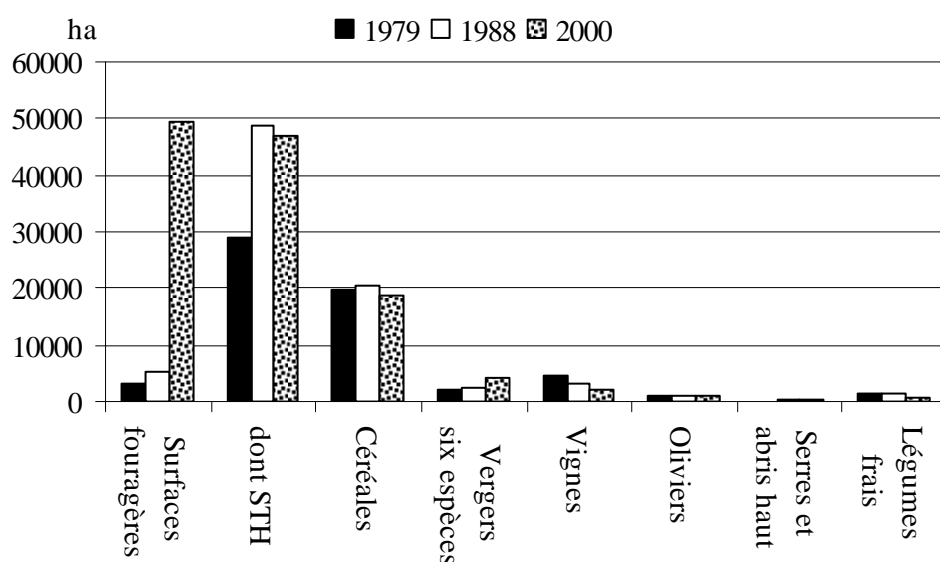


Figure II.10. Evolution des surfaces totales des différentes cultures dans la plaine de Crau entre 1979 et 2000. Source RGA 2000 (Djouabi, 2004).

II.3. Les méthodes d'étude développées dans ce projet

Les questions qui ont été posées pour cette thèse ont nécessité de mettre en œuvre plusieurs méthodes de nature différente. Les questions ne concernaient pas les mêmes objets et échelles d'étude. Chaque méthode a donc été adaptée à la question posée :

- Pour apporter des connaissances sur le fonctionnement du système biophysique et la réponse de la prairie au déficit hydrique, nous nous sommes basés sur une expérimentation en conditions réelles,
- Pour simuler le système biophysique, nous avons utilisé la modélisation numérique callée sur les données des expérimentations précédentes ainsi que sur des mesures complémentaires,
- Pour appréhender les logiques d'irrigation et les déterminants des actes techniques, nous avons mis en place une enquête en exploitation basée sur le concept de modèle d'action,
- Enfin pour représenter le système décisionnel et son impact sur le système technique, nous avons utilisé une modélisation à base de Règles de Décision.

II.3.1. L'expérimentation pour mieux comprendre le fonctionnement du système biophysique

L'expérimentation a été conduite au Domaine du Merle (43°38 N, 5°00 E) propriété de Supagro située à Salon de Provence.

II.3.1.1. Dispositif expérimental (Annexe 3)

Nous avons étudié deux parcelles du Domaine : la parcelle A et la parcelle B.

- La parcelle A est en production depuis 10 ans mais a été resurfacée en 2002. D'une superficie de 5.10 ha (435 m de longueur et 90 m de large), elle est divisée en deux planches d'irrigation (ou calan) : T d'une surface de 1.879 ha et P d'une surface de 2.012 ha. L'irrigation se fait en tête de la parcelle dans le sens de la longueur. Une vanne, positionnée sur la conduite enterrée basse pression, permet le réglage du débit d'entrée entre 0 et 160 l.s⁻¹. L'épaisseur de l'horizon limoneux de surface est estimée à 0.15-0.2 m, soit une épaisseur de sol de 0.60 m en moyenne. Au démarrage de l'expérimentation, les deux planches étaient comparables en termes de déroulement de l'irrigation, de flore, de production et de pente (2.90/00).

- La parcelle B a été complètement remodelée et nouvellement semée en 2002. Elle se divise en deux planches d'irrigation de 325 m de longueur et de pente 2.50/00. Leur surface est de

1.437 ha pour la planche T et 1.424 ha pour la planche P. C'est la parcelle la plus éloignée de la prise d'eau (soit 2.584 km de canal de distribution depuis la prise). Les débits d'entrée sont en moyenne de 150 l.s-1. Le canal d'amenée, est situé dans le sens de la largeur et l'arrosage est réalisé dans le sens de la longueur. L'épaisseur de sol sur cette parcelle est estimée à 0.50 m, soit un peu moins que sur la parcelle A. L'épaisseur de limons en surface est de l'ordre de 0.10 m. Cette parcelle est très différente de la précédente en terme de composition floristique et de densité de végétation à la coupe. Les rendements et les hauteurs de végétation y sont plus faibles que dans la parcelle A.

Le dispositif expérimental est basé sur la comparaison de deux modes de pilotage de l'irrigation (un par planche) dans chacune des parcelles. Un pilotage de l'irrigation par Tensiométrie (Tron et al., 2000) a été appliqué sur les planches P afin de mieux anticiper les irrigations et éviter des surdosages. Le pilotage traditionnel a été maintenu sur les planches T (voir chapitre III).

II.3.1.2. Données collectées

Les variables mesurées portent principalement sur le suivi de l'état hydrique du sol, de la dynamique de croissance et de la composition floristique de la végétation ainsi que sur le déroulement de l'irrigation (Tableau II.3). Les mesures clef, comme le suivi des tensions ou le suivi de la croissance, ont été répétées plusieurs fois par semaine pendant toute la saison d'irrigation. Le dispositif a été enrichi chaque année. Par exemple, l'évaluation du LAI n'a été mise en place qu'en 2005 du fait du besoin de données supplémentaires pour la modélisation. Les mesures sont basées sur un nombre de 5 répétitions par planche afin de prendre en compte l'hétérogénéité de la planche et relier ces mesures aux évaluations globales comme peut être par exemple le rendement machine. Cinq sites de mesures instrumentalisés (tensiomètres et tubes de sonde à neutrons) ont été positionnés dans chaque planche d'irrigation dans le sens de l'avancement de l'eau. Les mesures de LAI, biomasse ou de composition floristique ont ensuite été réalisées autour de ces sites de mesure de manière à associer au mieux les mesures plantes et les mesures sol. Chacun de ces 5 sites de chaque planche des deux parcelles représente donc un exemplaire du système biophysique étudié.

Pour certaines mesures très lourdes (composition floristique) nous nous sommes focalisés sur la parcelle A.

Les protocoles détaillés de ces mesures sont décrits dans les chapitres suivants (Annexe 3).

Variables mesurées	Fréquences de mesures	Parcelles et planches concernées	Méthode de mesure	Echantillonnage par planche
Tensions	2 fois par semaine jusqu'à juin 3 fois par semaine en été	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P	Tensiomètres Watermarks®	5 sites par planche
Température du sol	2 fois par semaine jusqu'à juin 3 fois par semaine en été	Parcelle A planche P Parcelle B planche P	Thermomètre à 0.3 m de profondeur	Site 3
Volumes entrée	En continu	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P	Limnigraphe enregistreur Thalimèdes®	Fossés d'aménée
Volumes sortie	En continu	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P	Limnigraphe enregistreur Thalimèdes®	Fossés de colature
Hauteur de la nappe	En continu	Parcelles A et B	Limnigraphe enregistreur Orphimèdes®	haut et bas de parcelle
Avancement	13 avancements au total entre 2004 et 2006	Parcelle A planches T et P	GPS	Ensemble de la planche
Qualité des eaux d'irrigation dans le canal amenée	8 mesures au total en 2005 9 mesures au total en 2006	Parcelle A planches T et P	Bandelettes	Fossés d'aménée
Qualité des eaux d'irrigation en colature	6 mesures au total en 2005 10 mesures au total en 2006	Parcelle A planches T et P	Bandelettes	Fossés de colature
Teneurs eau du sol sur l'ensemble du profil	Avant chaque irrigation au moins tous les 10 jours	Parcelle A planches T et P Parcelle B planche T	Sonde à neutrons	5 sites par planche
Données météorologiques	En continu	Ensemble du Domaine	Station météo	
Rendements	A chaque coupe	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P	Rendements machine – bottes pesées	Ensemble de la planche
Composition floristique	A chaque coupe sauf en deuxième et troisième coupe 2006	Parcelle A planches T et P	Prélèvements et tris	5 placettes par planche
Biomasse aérienne	1 à 2 fois par semaine	Parcelle A planches T et P	Prélèvements et séchage	5 sites par planche
LAI	Pas de mesures en 2004 1 fois tous les 10 j en 2006 15 mesures par planche en 2005	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P en 2006	LAI_2000 et photos hémisphériques	5 sites par planche
Teneurs en azote foliaire	5 mesures par planche en 2005	Parcelle A planches T et P	Analyses laboratoire	Sites 1 et 5
Evaluation du TTSW	Une fois en 2006	Parcelle A planche T	Sonde à neutrons	Site 5
Système racinaire	Une fois en 2005	Parcelle A planches T et P	Fosses et prélèvements racinaires	Sites 1 et 5
Hétérogénéité LAI et biomasse verte	Deux fois en 2005	Parcelle A planches T et P	LAI_2000 et prélèvements	Ensemble de la planche
Observations phénologiques	3 fois par semaine au minimum	Parcelle A planches T et P Parcelle B planches T et P	Visuels	Ensemble de la planche
Données climatiques	En continu	Domaine du Merle	Station météo	

Tableau II.3 : Les différentes mesures réalisées : échantillonnage, fréquence, matériel.

II.3.2. Les enquêtes pour mieux connaître le fonctionnement du système technique et décisionnel (Annexe 4)

II.3.2.1. Choix du dispositif d'enquête pour collecter des données sur le système décisionnel des agriculteurs

La compréhension des logiques d'irrigation et les déterminants des actes techniques renvoient directement à l'étude des exploitations agricoles et des systèmes de production (Capillon, 1993 ; Dore et al., 2006). Dans notre étude il s'agissait d'appréhender la diversité des fonctionnements et d'identifier les principaux déterminants des pratiques d'irrigation. Nous nous sommes orientés vers une enquête en exploitation pour rassembler ces informations ainsi que pour comprendre l'organisation fonctionnelle des exploitations agricoles. Une première analyse bibliographique a permis de confirmer que ces informations n'avaient pas encore été collectées auprès des exploitants agricoles.

La réalisation d'une typologie a été exclue de ce travail dans la mesure où il s'agissait d'appréhender la diversité des logiques et pas d'en évaluer la représentativité au niveau régional.

Une procédure en 5 étapes a été utilisée: i) délimitation du domaine d'étude à partir d'une stratification succincte du milieu basée sur la bibliographie et des connaissances expertes, ii) choix d'une grille d'échantillonnage, iii) préparation et réalisation des enquêtes sur le fonctionnement des exploitations avec un cheminement prévu dans la grille d'échantillonnage, iv) analyse et croisement avec le thème d'étude : formulation d'hypothèses sur le fonctionnement et mise en évidence de chaînes décisionnelles. Cette première phase d'enquête a enfin été validée par une deuxième phase d'enquête auprès d'une partie des exploitations. Cette deuxième phase d'enquête a consisté en un entretien semi-dirigé abordant les points portant encore à confusion ainsi que les hypothèses importantes du fonctionnement des exploitations.

II.3.2.2. Délimitation du domaine d'étude et échantillonnage

La délimitation du Domaine d'étude est basée sur la stratification du territoire et de la population agricole. Il s'agissait de définir des strates et d'enquêter une exploitation agricole dans chacune de ces strates.

Nous sommes repartis pour cela de nos connaissances du territoire de Crau (voir plus haut – Figure II.6). Une première stratification a été opérée à partir des 7 secteurs de la plaine de Crau. Cependant, 3 secteurs ont été considérés pour cette enquête. Nous avons décidé de ne tenir compte que des secteurs prépondérants dans la production de foin et dont les surfaces ne diminuaient pas au profit de l’urbanisation en zone périurbaine (secteurs d’Istres, d’Entressen et de Salon de Provence - Figure II.7). Nous avons aussi mis de côté les zones de bordures de la Crau où l’alimentation en eau est particulière (Secteur de Mas Thibert et la Haute-Crau). Ainsi, un premier découpage géographique accompagné du choix des principaux secteurs en prairies a permis de nous limiter aux zones de Arles à Saint Martin de Crau (secteur B) et de Saint Martin de Crau aux portes de Salon de Provence (secteur A). Ces deux secteurs A et B représentent 60% des surfaces totales en prairies.

Une méthode similaire a été appliquée pour stratifier les exploitations agricoles en fonction des systèmes de production et des surfaces en foin dans l’exploitation. Les exploitations agricoles ont été découpées en 4 grandes catégories de surface en foin sur la base des informations dont nous disposions (Figure II.8 et Figure II.9) : inférieur à 20 ha de foin, de 20 à 40 ha, de 40 ha à 100 ha et supérieur à 100 ha. Chaque catégorie représentait au total une surface en prairie équivalente. Enfin concernant les systèmes de production, il s’est avéré essentiel de n’étudier que les exploitations agricoles où le foin avait une place prépondérante dans l’exploitation agricole : c’est-à-dire les producteurs de foin en monoculture et les producteurs de foin - éleveurs soit environ 37% des exploitations (Comité du foin de Crau, communication personnelle). Les exploitations maraîchères et arboricoles ont donc été exclues de la zone d’étude. Le domaine d’étude est donc défini par cette double stratification (Tableau II.4). Sept exploitations agricoles parmi les 12 cases de cette grille ont ensuite été enquêtées.

		Secteurs géographiques	
SAU foin	SAU foin	Eyguières	Raphèle
Monoculture foin	20-40ha	X	X
	40-100ha	X	X
	>100ha	X	
Foin + Elevage	20-40ha		
	40-100ha	X	
	>100ha		X

Tableau II.4 : Grille d’échantillonnage proposée pour les enquêtes en exploitation.

II.3.2.3. La grille d'enquête (Annexe 4)

Le contenu de l'enquête est organisé en 5 thèmes :

- présentation générale et histoire de l'exploitation,
- organisation spatiale de l'exploitation,
- système de culture foin – des opérations techniques à l'économie,
- logiques de gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole,
- interactions entre le système de culture de foin et le système d'élevage.

Ces thèmes balayent l'ensemble du fonctionnement général de l'exploitation ainsi que les aspects spécifiques à la gestion de l'eau.

II.3.3. La modélisation pour reproduire le fonctionnement des différents compartiments du système de culture

Les deux précédentes phases, à savoir expérimentation et enquêtes, avaient pour but de rassembler des connaissances sur le système biophysique d'une part et le système technique et décisionnel d'autre part. Ces connaissances sont nécessaires pour proposer une représentation conceptuelle du système de culture étudié. Une dernière phase consiste donc à représenter le système conceptuellement puis numériquement de façon à en simuler le fonctionnement et les performances pour concevoir de nouveaux systèmes de culture. Deux types de modélisation sont mis en avant ici : la modélisation du sous-système biophysique à la fois de l'avancement de l'eau dans les parcelles et du fonctionnement du système sol-prairie, mais aussi, à l'échelle de l'exploitation agricole, la modélisation du sous-système décisionnel qui génère le sous-système technique.

Dans le cas de l'étude du sous-système biophysique, nous disposons de modèles dans la littérature, la méthode de travail a donc consisté en une adaptation de ces modèles au cas des prairies. Dans le cas du sous-système décisionnel et technique, il s'agissait de reconstruire un modèle intégrant les spécificités de l'irrigation gravitaire.

II.3.3.1. Modèle d'avancement de la lame d'eau

Le modèle SIPmerle que nous avons utilisé pour ce travail est une adaptation du modèle de l'onde cinématique au cas de la planche (solution simplifiée de St Venant) couplé à une loi d'infiltration à caractère prédictif (Mailhol et al., 2005). Compte tenu de la pratique

d'irrigation en vigueur consistant à couper l'alimentation avant que le front n'atteigne l'aval de la parcelle, l'usage d'une solution numérique de St Venant pour l'avancement nous paraît la mieux adaptée et plus précise pour simuler la récession⁶ de l'eau (phase importante en irrigation à la planche) qu'une solution analytique basée sur la simple conservation de la masse. Concernant l'infiltration, le fait de vouloir simuler l'impact de pratiques d'irrigation à l'échelle du cycle de culture nous condamne à faire usage d'une loi d'infiltration à caractère prédictif. En effet les conditions d'infiltration sont susceptibles d'évoluer au cours de ce même cycle en fonction des stratégies d'irrigation adoptées et des conditions climatiques.

Il fonctionne à l'échelle de la planche d'irrigation et au pas de temps de la minute. Ce modèle simule :

- la durée d'irrigation,
- la quantité d'eau apportée,
- la quantité d'eau infiltrée et sa répartition amont-aval,
- les performances hydrauliques de l'arrosage (Burt et al., 1997 ; Clemmens et Burt, 1997) (EA : efficience d'application, rendement hydraulique net, CU : coefficient d'uniformité, % de pertes en colatures, % pertes par percolation profonde)

Les données d'entrée sont peu nombreuses : débit d'entrée, largeur et longueur de la planche, pente et deficit en eau de la planche, rugosité (=1/Manning). Ces données sont des valeurs moyennes pour l'ensemble de la planche et de la durée d'irrigation.

Le modèle d'irrigation à la planche simule deux phénomènes : l'avancement de l'eau le long de la planche et l'infiltration. C'est l'équation de l'onde cinématique qui est utilisé pour simuler l'avancement :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q(\tau) \quad (2)$$

, associée à l'équation fondamentale de la dynamique cette équation devient :

$$S_0 = S_f = n^2 Q^2 / (A^2 R^{4/3}) \quad (3)$$

, où A = section mouillée, Q = débit, t = temps, q = taux d'infiltration, τ = opportunity time, S_0 = pente de la planche, S_f = pente, n = coefficient de rugosité, R = rayon hydraulique.

⁶ La récession est la 4^{ème} phase de l'irrigation à la planche et correspond à la disparition de l'eau sur la planche après coupure de l'arrivée d'eau.

La solution numérique de ces deux équations est basée sur la méthode des volumes

La culture est représentée par un module d'évaluation du LAI et un module de captation-absorption-conversion de l'énergie en biomasse (Annexe 5). Dans cette version fonctionnelle, le LAI et la biomasse sont deux variables d'état évaluées par différence entre un accroissement et une sénescence. L'accroissement est systématiquement modulé par des facteurs extérieurs comme l'état hydrique du sol, l'état azoté, les températures/somme des températures ou encore le vent. La plurispécificité est abordée sous l'angle des traits fonctionnels (Lavorel et al., 1997)

Le sol est représenté sous forme d'un réservoir à une seule couche sur laquelle un bilan hydrique simplifié est appliqué :

$$ASW_j = ASW_{j-1} + I + P - ET_a - D$$

Où ASW_j est le stock d'eau du sol au jour j , I l'irrigation, P les pluies, ET_a l'évapotranspiration réelle et D le drainage.

L'indice de stress est ensuite défini non linéairement en fonction du niveau de remplissage FTSW (Lacape et al., 1998) avec $FTSW = ASW/TTSW$.

Une description plus complète du modèle est présentée dans le chapitre IV.

II.3.3.3. Modèle décisionnel

Nous ne disposons pas dans la littérature de modèle spécifié pour l'irrigation gravitaire. La méthode mise en place a donc consisté en la reconstruction d'algorithmes décisionnels à partir de l'approche du modèle d'action (Aubry et al, 1998b) en intégrant les spécificités de l'irrigation gravitaire et de la prairie. L'écriture du modèle est basée sur l'identification de règles de décision RDD pour la gestion du système de culture en lien avec l'irrigation (Bergez et al., 2001). Ces RDD ont été traduites sous la forme d'une condition booléenne : « IF indicateur ALORS action 1 SINON action2 » puis organisées. Le modèle fonctionne à l'échelle du système de culture et à pas de temps journalier.

Une description plus complète du modèle est présentée dans le chapitre V.

CHAPITRE III

FONCTIONNEMENT DU SYSTEME PRAIRIAL SOUS DEFICIT HYDRIQUE MODERE

III. Fonctionnement du système prairial sous deficit hydrique modéré

III.1. Objectifs et démarche

Comme indiqué dans le chapitre précédent, ce travail sur l'analyse et la conception de système de culture prairiaux irrigués a été conduit en plusieurs étapes, chacune étant associée à un sous-système du système de culture prairie. Dans ce chapitre, nous analysons le fonctionnement du sous-système biophysique en fonction du régime d'irrigation qui lui est appliqué. Les objectifs de ce chapitre sont :

- (1) de dégager, à partir d'une analyse expérimentale pluriannuelle, les déterminants essentiels des performances de la prairie en matière de production (rendement, composition floristique) et d'impact environnemental (pertes d'eau),
- (2) d'expérimenter un pilotage d'irrigation basé sur l'état hydrique sol du système, en utilisant la tensiométrie ou une approche basée sur les stocks d'eau,
- (3) d'élaborer une base de données permettant d'élaborer un modèle dynamique de simulation du fonctionnement de la prairie en fonction du régime d'irrigation.

Nous nous basons sur la Figure I.1 pour la mise au point du protocole et l'analyse des expérimentations

Cette partie fait l'objet d'un article, présenté plus loin, et qui a été accepté dans *European Journal of Agronomy*. Les résultats de 2006 sont présentés en Annexe 6.

L'irrigation par gravité et submersion telle que pratiquée dans notre région d'étude est une technique très consommatrice en eau et en main d'œuvre (chapitre I). Ceci est d'autant plus vrai dans des sols caillouteux à faible rétention en eau et à forte macroporosité. Passer à une technique d'irrigation plus efficiente comme l'aspersion n'est pour autant pas la solution car dans une zone aussi ventée les pertes par évaporation seraient très élevées (Ruelle et al., 2004) et cela induirait de forts investissements pour la mise en pression et la distribution de l'eau. Par ailleurs le fonctionnement de la nappe de Crau nécessite le maintien d'un drainage minimum sous les parcelles de prairie. Dans ce contexte, nous nous sommes donc focalisés sur l'amélioration de l'efficience de la technique de l'irrigation gravitaire notamment par la modification des fréquences d'irrigation.

Un dispositif expérimental a été mis en place afin de tester le pilotage par Tensiométrie de l'irrigation (Tron et al., 2000) ce qui n'avait encore jamais été expérimenté sur des prairies et des peuplements plurispécifiques. Cette méthode, qui a permis de créer des déficits hydriques modérés maîtrisés et régulés par Tensiométrie, est proche des démarches de « Regulated Deficit Irrigation » RDI (Oweis et al., 1998). En effet, le RDI peut être défini par l'application d'une quantité limitée d'eau basée sur l'état hydrique du sol, excepté pendant des périodes critiques du développement de la culture, afin de contrôler le développement végétatif et reproducteur de la culture (White et Raine, 2004) tout en améliorant l'efficacité d'utilisation de l'eau (Water Use Efficiency, WUE).

Ce dispositif a donc été conçu pour répondre à l'objectif 2 présenté ci-dessus, mais il a aussi permis de générer, à travers les parcelles, les régimes hydriques, les périodes de l'année et les années, une gamme de situations de fonctionnement du système biophysique qui permettait de répondre aussi aux objectifs 1 (analyse pour la modélisation conceptuelle) et 3 (collecte de données pour la modélisation numérique).

Le dispositif expérimental ayant été décrit en détail dans le chapitre II, nous ne rappelons ici que les éléments essentiels à la compréhension de ce chapitre. Deux parcelles expérimentales, chacune divisée en deux planches d'irrigation, ont été instrumentalisées. Deux méthodes de pilotage de l'irrigation ont été testées sur chaque parcelle pendant trois ans (2004 à 2006) : pilotage traditionnel de la plaine de Crau et pilotage tensiométrique. Chaque planche d'irrigation a ensuite été divisée en 5 largeurs dans le sens de l'avancement de l'eau afin de constituer 5 répétitions des mesures.

Des suivis réguliers ont été réalisés sur ces planches d'irrigation. Il s'agissait d'évaluer :

- (1) les variables d'état du système et leur évolution (Figure I.1) : le stock d'eau du sol, l'indice foliaire et la biomasse ;
- (2) les variables de flux du système (Figure I.1) : prélèvements d'eau par les plantes – tensions aux différentes profondeurs, l'avancement de l'eau dans la parcelle ;
- (3) Les indicateurs de performance du système (Figure I.1) : l'eau consommée, les pertes en colature, le rendement ainsi que la qualité du foin. La notion de qualité – foin de Crau AOC – n'étant pas assez précise pour un suivi parfaitement objectif, nous avons décidé de nous focaliser sur deux mesures objectives entrant dans cette notion de qualité : la composition floristique et la valeur pastorale (Daget et Poissonet, 1971) ;

Des mesures ponctuelles ont aussi été programmées pour caractériser le sol.

III.2. Ce qu'il faut retenir

III.2.1. Les prairies plurispécifiques de Crau sont très sensibles à des déficits en eau du sol modérés

Le dispositif expérimental s'est révélé relativement complet et les résultats cohérents entre sites de mesures. Une bonne adéquation entre les mesures d'état hydrique du sol – tensions et Fraction d'eau totale Transpirable par la plante FTSW- et les mesures sur la culture ont permis de mieux connaître le fonctionnement de la prairie soumise à des déficits hydriques modérés et temporaires.

Les trois premières années d'étude ont mis en évidence la sensibilité de la prairie à des déficits hydriques modérés induits par la modification du rythme des irrigations. Des arrêts de croissance ont été observés en période estivale pour des FTSW de l'ordre de 0.6, ce qui est généralement considéré comme la limite de la réserve facilement utilisable par les plantes, au-dessus duquel les fonctions de photosynthèse et de croissance sont peu affectées (Volaire et Lelièvre, 2001 ; DaCosta et Huang, 2006). Ces arrêts de croissance, non rattrapés, sont à l'origine de baisses non négligeables des rendements. L'eau peut donc être considérée comme le facteur limitant majeur de la croissance des prairies de Crau.

A travers l'ensemble des situations expérimentales (parcelle, régime hydrique, cycle de croissance⁷ et année) on peut établir une relation entre le déficit hydrique moyen pendant un cycle de croissance, évalué par le FTSW moyen, et les performances du système, rendement et efficience de l'eau (Pellegrino et al., 2005).

Des modifications importantes et rapides de la composition floristique en biomasse et de la valeur pastorale – à différencier d'évolutions naturelles saisonnières (Volaire et Lelièvre, 1992) - ont aussi été notées d'un cycle de croissance à l'autre selon les méthodes de pilotage de l'irrigation. Ces évolutions rapides ont pu être mises en relation avec l'état hydrique du système, indiqué par le FTSW moyen entre deux coupes, et peuvent s'expliquer en termes de groupes fonctionnels dominants (Liancourt et al., 2005). Aux différentes sensibilités au déficit hydrique des groupes fonctionnels d'espèces s'ajoutent les relations de compétitions. Ceci conduit à des modifications des contributions relatives de chaque espèce à la biomasse totale

⁷ On définit ici un cycle de croissance comme la période de croissance de la prairie entre deux défoliations notamment deux coupes.

lorsque le déficit hydrique moyen augmente, la part des espèces dominantes en l'absence de déficit hydrique diminue au profit d'espèces subordonnées.

III.2.2. Pilotage de l'irrigation des prairies et modification des fréquences d'irrigation

Cette démarche d'expérimentation a été l'occasion de tester, en conditions réelles de production, un système de pilotage de l'irrigation gravitaire basé sur la tensiométrie. Cette approche, peu fréquente en irrigation gravitaire, était *a priori* la mieux adaptée : (i) à une gestion visant à optimiser une réduction modérée des doses d'irrigation en fonction de la croissance de la prairie et des pertes par drainage (Tron et al., 2000 ; Wery, 2005) ; (ii) à l'anticipation de la nécessité d'arroser (Tron et al., 2000).

Le premier enseignement est que les tensiomètres ont bien fonctionné malgré les sols caillouteux de la Crau et les 5 sites de mesure d'une planche d'irrigation ont donné des résultats cohérents en dépit de la variabilité spatiale des sols, ce résultat intéressant est important pour la mise en pratique de la méthode.

La bonne adéquation des mesures tensiométriques dans la zone racinaire, ainsi que du FTSW en général bien corrélé avec ces mesures (Belaygue et al., 1996), avec la production de foin permet de conclure à l'intérêt de ces deux indicateurs pour le pilotage de l'irrigation des prairies plurispécifiques dans notre cas d'étude.

D'autre part, l'expérimentation a mis en évidence que, dans les conditions traditionnelles d'irrigation, les besoins en eau de la prairie ne sont pas satisfaits si l'on reste sur un objectif de rendement maximum. La production de foin est souvent limitée en période estivale. Il est donc particulièrement délicat d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau en modifiant les fréquences d'irrigation en période de fort déficit climatique sans risquer des pertes de rendement et donc de revenu compte-tenu du prix de vente du foin. Contrairement à ce qui est observé sur d'autres cultures (Wery, 2005 ; Deng et al., 2004), l'application d'une approche de RDI régulée par tensiométrie n'a pas permis d'améliorer simultanément le rendement et l'efficacité de l'eau, étant donnée la grande sensibilité de la prairie au déficit hydrique. Elle permet cependant, en jouant sur la profondeur du tensiomètre de référence, d'orienter la gestion de l'eau vers un compromis axé soit sur le rendement, soit sur la limitation des pertes en eau. L'application de cette méthode de pilotage de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation semble difficile compte-tenu des marges de manœuvre limitées en matière de temps de travail

et d'accès à l'eau (Chapitre V). Par son caractère prévisionnel, une approche basée sur la simulation de la FTSW par bilan hydrique, semble beaucoup plus facilement applicable en pratique. Les deux approches peuvent être complémentaires à travers l'utilisation de tensiomètres soit comme indicateurs d'alerte sur des parcelles guide, soit pour caller les seuils de FTSW.

III.3. Article: Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers

Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers

MEROT A.^{1,2}, WERY J.^{1*}, ISBÉRIE C.³, CHARRON F.⁴

¹ UMR System (CIRAD-Inra-SupAgro), bâtiment 27, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

² Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale, Le Tholonet –CS 70064, 13182 Aix en Provence Cedex 5, France.

³ UMR G-EAU (CEMAGREF-ENGREF-CIRAD-IRD), Cemagref, 3275, route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix en Provence Cedex 5, France.

⁴ SupAgro Montpellier, Domaine du Merle, Route d'Arles, 13300 Salon de Provence, France.

* corresponding author: Fax: +33 (0)490612507; Email : wery@supagro.inra.fr

Abstract

To improve Water Use Efficiency (WUE) of border irrigation, an integrated approach of Tensiometric Regulated Irrigation that considered both crop response (yield and quality) and water losses was investigated. The study was carried out on plurispecific and permanent grasslands on a Mediterranean plain (Crau region in France) with high quality hay production. The Soil Water Potential (Ψ_{total}) was used to schedule irrigation and diagnose mild water deficits. Neutron probe measurements were used to quantify the soil water deficit experienced by the plants based on the Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW). The dynamic of aboveground dry matter production and botanic composition were analysed with reference to the FTSW. The results show the extreme sensitivity of grassland to a mild Soil Water Deficit between two irrigation dates. Across the range of soil water deficit observed in these experiments, both hay production and botanical composition were closely related to the average FTSW. Aboveground biomass rapidly stopped increasing when the FTSW reached 60%. The botanical composition was also significantly changed by water deficits. The concordance between the soil water measurements and grassland response implies that the Regulated Deficit Irrigation based on the soil water potential or FTSW can be used to optimize border irrigation efficiency when the trade-off between water saving and profit losses by mild water deficit is not easy to manage.

Key words

Border irrigation, Plurispecific grassland, Tensiometers, Regulated Deficit Irrigation, FTSW, yield, botanical composition

Introduction

Surface irrigation is the commonest irrigation method in the world and covers 90% of irrigated areas. It requires a huge amount of water and substantial works in order to optimize water use based on the Water Use Efficiency (WUE). In the Crau region of southern France, farmers use the border system to irrigate stony soils with a low retention capacity, resulting in applications of 15,000 to 20,000 m³/ha⁻¹/year⁻¹, and losses of 60 to 70% of the water applied. This system is applied on plurispecific permanent grassland to produce high-value hay with a Certified Origin Product (COP) label which is exported all around the world. Changing to sprinkler irrigation would induce other losses by evaporation on this windy plain and would reduce the summer recharge of the watertable, which is also used for urban and industrial purposes. However, conventional water management guidelines have to be revised in order to ensure higher water productivity while retaining the groundwater recharge, hay production and quality at the level required for farm profitability, and the COP label.

Regulated Deficit Irrigation (RDI) has been found to improve Water Use Efficiency (WUE) on many crops in different parts of the world such as, cotton (White and Raine, 2004), wheat (Deng et al., 2004; Oweis et al., 1998), peach (Girona et al., 2005) and pear tree (Davies and Hartung, 2004; Marsal et al., 2002). The RDI's paradigm may be defined as the application of a limited amount of water based on

the soil water state, apart from during critical crop growth stages (White and Raine, 2004), to control reproductive development and vegetative growth, while reducing drainage losses and improving the WUE. The underlying mechanism is that the physiological processes involved in fruit or grain production are less affected than those involved in transpiration and vegetative growth (Wery, 2005). According to the above-mentioned studies, the RDI is likely to improve the WUE while reducing aboveground biomass production when a certain threshold of soil water deficit is reached. But this concept has not been applied to border irrigation and plurispecific and permanent crops, such as the Crau grassland. A certain number of studies on grassland have been carried out, but they have focused on sprinkler irrigation (Smeal et al., 2005) and are therefore difficult to extrapolate to border irrigation which is characterized by long and infrequent irrigation periods, and heterogeneous distribution in the field. To use the RDI approach, farmers have to monitor the plant and soil moisture state and deliver regulated quantities of water on demand (Davies and Hartung, 2004). Plant indicators like the Crop Water Stress Index (CWSI), which was tested in tall fescue (Al-Faraj et al., 2001), or soil indicators like the amount of soil water can be used to monitor the RDI. A better approach is based on tensiometric probes (Tron et al., 2000) because irrigation can be managed with soil water potential in the root zone, as an indicator of the soil water deficit experienced by the plant (Wery, 2005), and with water flows below the root zone to control drainage and nitrate leaching (Cuny et al., 1998). Indeed a set of tensiometers at different depths will give information on water flows in the soil that are not easily available in field conditions: capillary rises, plant uptake, evaporation, efficient rainfalls. The Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW) (Ritchie, 1981; Sinclair and Ludlow, 1986) could also be used as another indicator for Regulated Irrigation management as it gives information on both the water storage capacity of the soil to limit drainage, and on the soil water deficit experienced by the plant in order to optimize plant stress (Wery, 2005). It has been used on a wide range of crops including pea (Lecoeur and Guillioni, 1998), cotton (Lacape et al., 1998), sunflower and maize (Cabelguenne and Debaeke 1998), vine (Pellegrino et al., 2006), fescue and orchard grass (Volaire and Lelievre, 2001).

The aim of this study is to establish the scientific background to an integrated Tensiometric Regulated Irrigation approach applied to border irrigation of grassland based on the water dynamic in the root zone and above-ground biomass and composition in the grassland system.

Materials and methods

Experimental design

Experiments were carried out in a windy Mediterranean climate in Southern France for two years (2004 and 2005). The climatic water deficit, calculated as the cumulative difference between the Potential Evapotranspiration (ET_{ref}) and rainfall, reached 927 mm in 2005 (Fig. 3a) and 788 mm in 2004 (Fig. 3b), depending largely on the wind.

Soil description: The studied soil (Fig. 1a) is a calcic luvisol (FAO, 1981) with an irrigric upper horizon (5% stones), over an intermediate layer of loamy sand (from 15% to 75% rocks) and a petrocalcaric horizon. The upper layer is 0.1 to 0.4 m thick and the pudding stone is found at a depth of 0.3 to 0.7 m. The roots are concentrated in the upper 0.3 m and the root density decreases rapidly until the pudding stone which is water permeable but does not allow root growth. The groundwater table is superficial with its highest water level at the end of the summer irrigation season and lowest at the end of winter (respectively 6 and 10 m depth). This water table behaviour is not common but is consistent with the important amount of water drained from border irrigation in this region.

Irrigation design: Water is supplied at the irrigation border. The irrigation process consists in two phases: flooding the border (inflow and advance) and recession of the water. Gravity-fed water supply channels are constructed along the upper side of the border and provide a direct supply to the irrigation border (inflow phase). Flooding takes place from this supply channel, and the water progressively runs down the slope (advance phase) and fills the border. Before complete flooding, when the progress of the water front covers 90% of the length of the border, the water supply is stopped (shut-off). The recession phase begins and the surplus water is progressively drained to the bottom of the irrigation

border and evacuated in an outflow channel. Water supplies are scheduled to recharge all the soil water reserve.

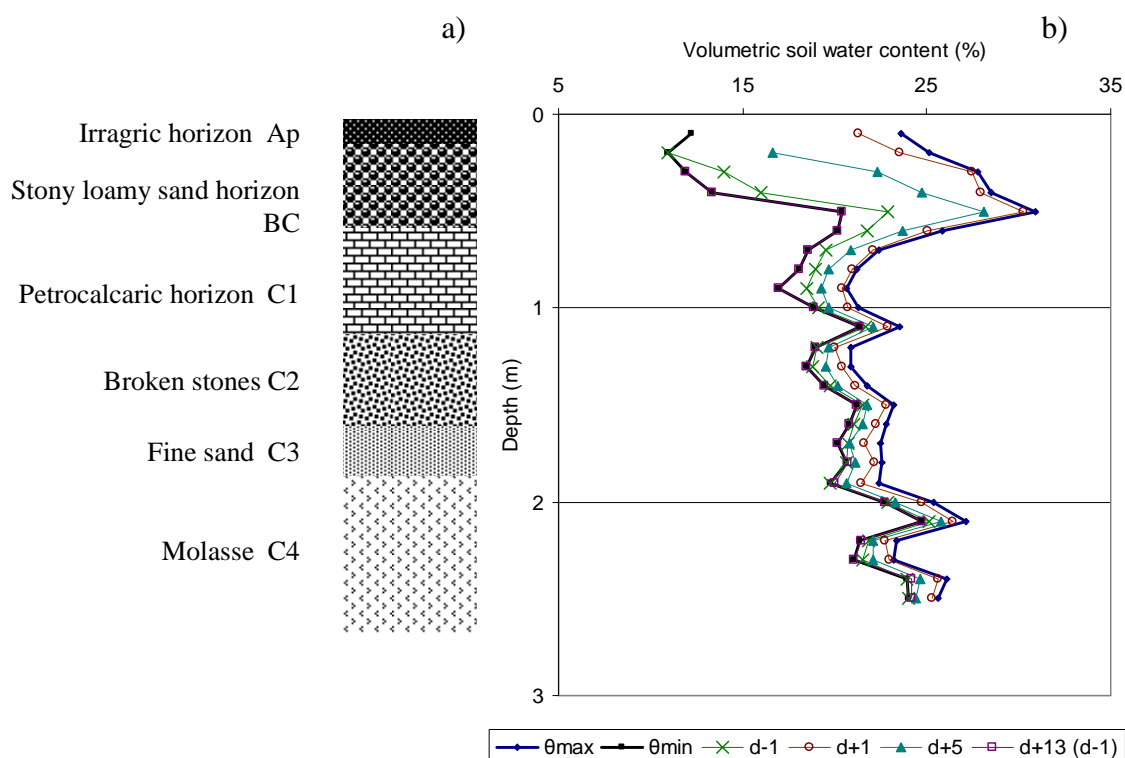


Fig. 1. Typical soil profile of Wurm Crau (a) and dynamic or volumetric Soil water Content (%) along the soil profile between 2 irrigation events (b) – Field A. Measurements were realized before irrigation event (d-1), and after irrigation events (d+1, d+5, d+13). d+13 was also d-1 of the next irrigation event.

Irrigation scheduling: Two grasslands (field A and field B) were studied. On each field, two watering regimes were compared: Control (C) corresponding to standard irrigation practices and Tensiometric Regulated scheduling (T1 in 2004 and T2 in 2005), each corresponding to a particular irrigation border. The Control water input was reached without controlling the soil water deficit. The interval between two successive irrigation events varied between 10 and 13 days. This period was determined by the number of days required to irrigate all the fields of the farm. Following the approach of Tron et al. (2000) and Isbérie et al. (2004), Tensiometric Regulated Irrigation in T1 and T2 was scheduled according to the evolution of soil matric potential (Ψ_m) between two irrigation events (Richards and Marsh, 1961; Peyremorte, 1984). After each watering operation, the matric potential (Ψ_m) decreased with the reduction of soil water content (θ_v) by plant uptake and soil evaporation. Due to the exponential shape of the curve θ_v/Ψ_m , a slight increase of the water deficit translates into a higher decrease of Ψ_m , thereby increasing the risk of plant water stress between two tensiometric measurement dates. Therefore, Tensiometric Regulated Irrigation was activated when the slope of the matric potential curve at the reference depth increased between two measurement dates. 0.4 m was chosen as the reference depth in 2004 for Tensiometric scheduling T1, but it led to yield losses of more than 30% compared to the Control input (Table 1). Therefore, in 2005, experiments were conducted using Tensiometric scheduling (T2) at a reference depth of 0.2 m in order to reduce the intensity of the soil water deficit experienced by the grassland.

Measurements

Weather measurements: Rainfall (R), air temperature (mean, minimum and maximum value), relative humidity, global radiation and wind speed were measured by a weather station (Model 411, Cimel,

Paris) located near the experimental fields. These variables were used to calculate the Penman Potential Evapotranspiration ET_{ref} (Allen et al, 1998).

Table 1: Water fluxes at field scale for all irrigation treatments tested in 2004 and 2005 (Control and Tensiometric scheduling T1 and T2 in the 2 experimental fields A and B).

Field	Year	Treatment	Rainfalls (mm)	$ET_{ref} - R$ (mm)*	Water Supply (mm)	Water loss (mm)	E_r (mm) **	Deep Drainage (mm)	Mean Supply per irrigation event (mm)	Number of irrigation
A	2004	Control	92	635	2072	404	498	1262	150	14
		T1	92	635	1500	NM	474	NM	149	10
	2005	Control	69	804	2182	384	519	1348	183	12
		T2	69	804	2728	387	575	1835	181	15
	2006	Control	65	824	2323	561	642	1185	178	13
		T2	65	824	2781	407	646	1793	185	15
B	2004	Control	92	635	2415	255	466	1786	214	11
		T1	92	635	1630	200	605	917	235	7
	2005	Control	119	812	3075	787	677	1730	235	13
		T2	119	812	4237	1037	762	2557	255	10

*The climatic deficit was calculated during the irrigation period.

**Including rainfall that recharged the soil water reserve during the irrigation season: 131 mm in 2005 and 127 mm in 2004.

NM : not measured

Soil water matric Potential (Ψ_m) and Total Potential (Ψ_{total}): Matric Potential Ψ_m was measured using tensiometric probes (Model Watermarks®, Challenge Agriculture, Ambillou, France – precision 5 kPa). Each irrigation border was equipped with five measurement stations installed every 80 m in the water flooding channel. This takes into account the variability in soil thickness and water dose. Tensiometer probes were installed at depths of 0.2, 0.4 and 0.6 m in the five measurement stations. The purpose of these measurements was not to measure the average value of Ψ_m for the entire border but only to obtain an indicator of the soil water deficit in order to schedule irrigation. As shown in previous studies (Moutonnet et al., 1981), although more than 200 measurement sites would be required to assess the spatial variability in a field, in actual operational terms a limited number of sites can represent the overall evolution during a dehydration-irrigation phase. Irrigation was scheduled on the basis of the evolution of the median value of the five Ψ_m measurements between two successive measurements (Isberie et al., 2004; Tron, 2000). The soil water potential (Ψ_{total}) was calculated as the sum of matric (Ψ_m) and gravimetric potential z (with $z = 2$ kPa at 0.2 m; $z = 4$ kPa at 0.4 m and $z = 6$ kPa at 0.6 m) and was very close to Ψ_m . Ψ_{total} at depths of 0.2 m, 0.4 m and 0.6 m allowed the water flows along the root profile to be analysed and drainage events to be identified. All measurements were performed during the soil drying phase between two irrigation events.

Volumetric Soil Water Content: The Volumetric Soil Water Content (θ_v) was measured with a neutron probe (Model 503 DR CPN®, Vectra, la Verrière, France – mean error 2-5%) inserted in aluminium access tubes (diameter 41-45 mm). Measurements were made every 0.1 m down to 1 m and every 0.2 m from 1 m to 2.4 m. In agreement with the soil description (Fig. 1a), one meter was sufficient to measure the water extraction by grassland in these soils. Field calibrations were carried out to relate the neutron probe to gravimetrically measured soil water content (method CEA Cadarache - France, IRD unpublished) for each soil layer.

Relationship between soil water suction ($|\Psi_m|$) and volumetric soil water content (θ_v): Over the entire range of the absolute value for the soil matric potential $|\Psi_m|$ obtained at various depth, dates and sites for the two experimental years, an exponential relationship was calculated between $|\Psi_m|$ and the soil water content θ_v at 0.2 m, 0.4 m and 0.6 m (with R^2 of 0.71, 0.78 and 0.74 respectively). It was used to calculate θ_v , and therefore the FTSW when neutron probe measurements were not performed.

Total Transpirable Soil Water (TTSW) and Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW): Total Transpirable Soil Water (TTSW) is defined (eq. 1) as the difference, over the soil depth explored by the roots (0.6 m), between the Soil Water Content at field capacity (θ_{\max}) and the Minimum Soil Water Content (θ_{\min}) measured for this soil with this grasslands (Ritchie, 1981; Sinclair and Ludlow, 1986).

$$TTSW = \sum_0^{0.6m} \theta_{\max} - \theta_{\min} \quad (1)$$

These limits depend on the soil texture, and the θ_{\min} on the water uptake capacity of the roots (Cabelguenne and Debaeke, 1998). Following the approach of Lacape et al (1998), these two characteristic values were obtained from measurements with a neutron probe over the soil depth explored by the roots. The average Soil Water Content at field capacity (θ_{\max}) was measured 24 h after a water supply, and the Minimum Soil Water Content (θ_{\min}) was observed in 2004 for a T1 watering regime (day 157). The Available Soil Water (ASW) on day (d) was calculated as the difference, over the 0-0.6 m soil layer, between $\theta_v(d)$ and θ_{\min} (eq. 2). The Fraction of Transpirable Soil Water (FTSWd) on day (d) was defined as the ratio of ASW(d) to TTSW (eq. 3), as proposed by Sinclair and Ludlow (1986):

$$ASW(d) = \sum_0^{0.6m} \theta_v(d) - \theta_{\min} \quad (2)$$

$$FTSW(d) = \frac{ASW(d)}{TTSW(d)} \times 100 \quad (3)$$

Estimation of Actual Evapotranspiration (ETa): The cumulated ETa was estimated for each treatment and year per border using a simplified water balance between two irrigation events (eq. 4).

$$ETa = \sum_{i=1}^I \left[(ASW(di+1) - ASW(di-1)) + \sum_{j=1}^{j(i)} \min(R_{ji}; (TTSW - ASW_j)) \right] \quad (4)$$

where i is the number of irrigation event; di-1 the day before the irrigation event i; di+1 the day after the irrigation event i; Rji rainfall supply for the rainfall event j, and j(i) the number of rainfall events between i-1 and i. ASW(di+1) is assumed to be equal to TTSW after each irrigation.

Control of incoming and outgoing water fluxes at border scale: Two Parshall flumes were used to measure incoming and outgoing water fluxes. The height of water in the flumes was obtained from water-level gauges recorded every 15 minutes by a data logger (Model Thalimèdes – OTT messtechnik® -France, Aix en Provence – precision 0.001 m). The flow rates were calculated as a function of the water level head. For a given field, the inflow rates were constant (field A: 140 l m⁻¹; field B: 150 l m⁻¹) throughout each irrigation event, with a negligible variation between the events. They were therefore used to evaluate the total amount of water for the season and WUE. The cumulated deep drainage (D) associated with irrigation was then calculated as follow (eq. 5):

$$D = \sum_{i=0}^I (enteringfluxes - outgoingfluxes - (ASW(d+1) - ASW(d-1))) \quad (5)$$

Yield and herbage growth: Yields were measured at each mowing of all the area of the border, apart from a 5.50 m wide strip all around the irrigation borders, and expressed in Tonnes of Dry Matter per hectare. The yield normalized by the amount of water used by the crop gives the WUE at border scale (Table 3). The above-ground biomass was measured every 3 days for each treatment and replicated on 5 subplots of 0.18 m² near the 5 stations and cut 0.02 m above the ground using a small clipping machine. Each sample was dried at 60° C for 75 h to assess its dry matter content.

Botanical composition: The botanical composition was characterized just before mowing. Five samples of 0.6 m² were taken in each sub-field using this same approach. The herbage was sorted in 13 categories which were defined in agreement with the criteria for the quality label (COP) of Crau

hay: Senescent material (1); Legumes (2) (*Medicago lupulina* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Lotus corniculatus* L., *Vicia cracca* L.); Grasses: *Dactylis glomerata* L. (3); *Lolium perenne* L. and *Poa pratensis* L. (4); *Holcus lanatus* L. (5); *Arrhenatherum elatius* L. (6); *Festuca pratensis* L. (7); *Setaria glaucus* L. (8); Diverse plants: *Plantago lanceolata* L., *Taraxacum officinale* Weber., *Tragopogon pratensis* L., *Galium mollugo* L., *Galium verum* L. (9); *Daucus carota* L. (10); *Achillea millefolium* L. (11); *Pastanica silvestris* L. (12); Undesirable plants, including *Rumex acetosa* L., *Paspalum dilatatum* Poir. (13). The botanical composition was expressed in percentage of dry matter for each category compared to the total above-ground biomass. The synthetic pastoral value of each border was then calculated from frequency indices and the specific quality value (Daget and Poissonet, 1971).

Results

Soil water dynamic and crop water uptake

Dynamic of total soil water potential (Ψ_{total}) during the cropping season: In 2004 (Fig. 2), until the first mowing, the irrigation pattern was the same for Control and Tensiometric treatments (T1), and Ψ_{total} showed similar patterns between the two treatments. After each irrigation event, Ψ_{total} at 0.2 m deep stayed above -10 kPa for a few days and then decreased slowly for Control and T1. At lower depths (0.4 and 0.6 m), the availability of water remained high, as shown by the high values of Ψ_{total} . In summer (day 160 to day 257), there were more irrigation events (Fig. 2). The rate of Ψ_{total} reduction was higher at 0.2 m where water uptake occurred first due to a higher root density and evaporation. Nevertheless Ψ_{total} at 0.4 and 0.6 m reached twice the values as those observed at a depth of 0.2 m, indicating soil dehydration over the entire soil profile. After the 3rd mowing, just one irrigation event was implemented.

In 2005 (Fig. 3), the number of irrigation events was higher for T2 than for Control. Ψ_{total} decreased more slowly at the beginning of the irrigation season at 0.2 m, and water stayed available at depths of 0.4 and 0.6 m. Until completion of the first mowing, the water supply and consequently soil water status were similar for the two treatments. In the summer (day 140 to day 240), the high slope of Ψ_{total} at 0.2 m led to more irrigation events for T2. Crop water uptake at 0.4 and 0.6 m was also higher than at the beginning of the season. After the third mowing, the gradient of the Ψ_{total} curves remained shallower, due to the lower ET_{ref}, leading to less frequent irrigation.

The minimum values of Ψ_{total} remained above -60 kPa, which is higher than observed in other irrigated cropping system (Tron et al, 2000; Kruger et al, 1999; Cuny et al, 1998).

Water flow directions in the soil: Water flows in the rooting zone were analysed using Ψ_{total} gradients, with water moving from the high to the low values. Just after application of the water, drainage was observed for one day between 0.2 to 0.6 m, which conforms to the large amounts of water supplied. The water flow was then upward, with a rise first observed between 0.4 m and 0.2 m, where the root density was highest. The limit of evaporation and drainage fluxes progressively fell due to plant uptake from 0.4 m to below 0.6 m. Ascendant flows over the entire rooting profile were finally observed until the next irrigation event. Ψ_{total} measurements at a depth of 0.8 m in field B (not shown) indicated that drainage occurred below 0.6 m, except when Ψ_{total} significantly decreased at 0.2 m during the summer. Thus, except for a few days before summer irrigation events, the capillary rise from below the root profile can be assumed to be negligible.

Water balance at field scale: In 2004 and 2005, the climatic water deficits were compensated by the amounts of water supplied by irrigation (Table 1). T1 received less water than Control in 2004, itself receiving less water than T2 in 2005. These differences were the consequences of various irrigation events depending on the irrigation rules for each method. Crop water consumption was higher in 2005 than 2004 in both repetitions. This can be explained by the higher climatic demand but also by the longer duration of the cropping season (one month longer in 2005). The cumulated drainage flows represented 60 to 70% of the amount of water applied, and increased with this amount across fields, treatments and years.

2004 (a)

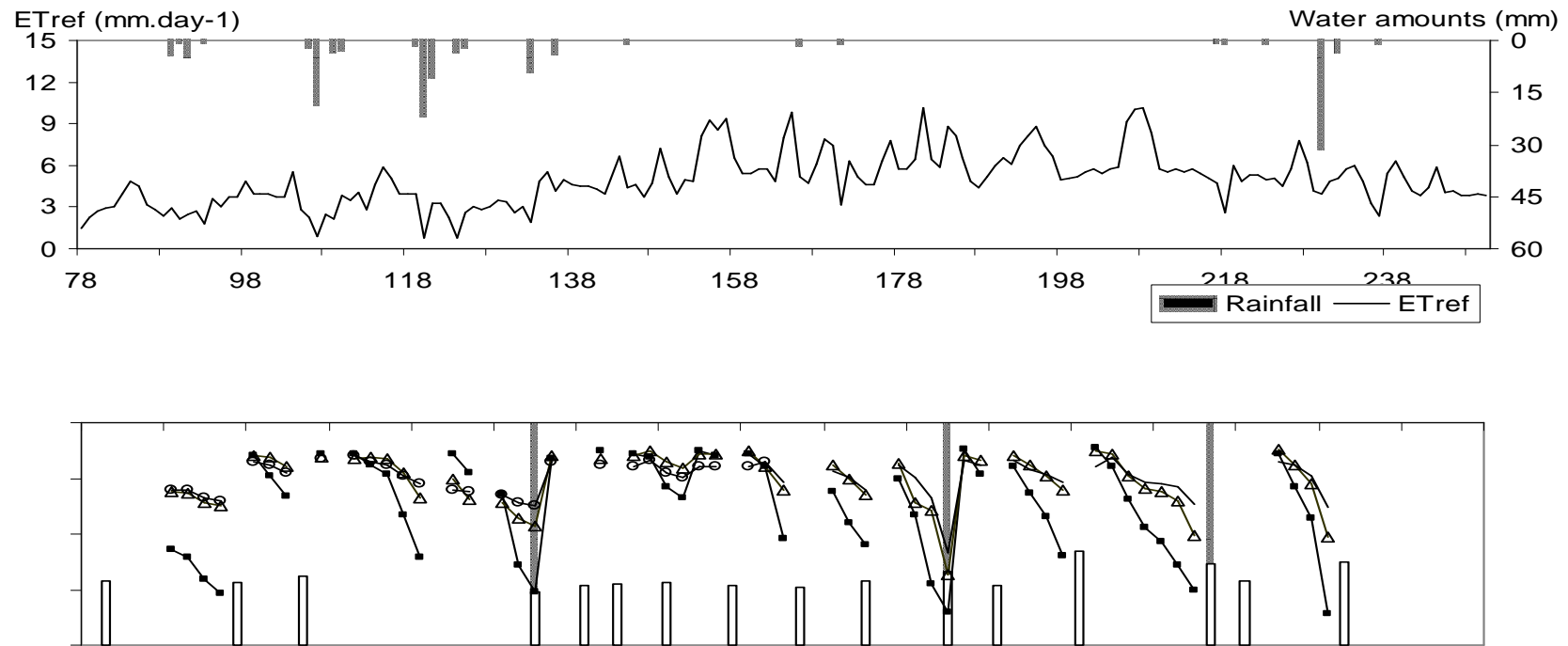


Fig. 2. Water amounts (Rainfalls and irrigation events) and daily Potential Evapo-transpiration (ETref) in 2004 (a). Irrigation scheduling (Control (b) and Tensiometric scheduling T1 (c) from changes in soil water potential at 0.2, 0.4 and 0.6 m depth. Three growth periods ended by a mowing are presented.

2005 (a)

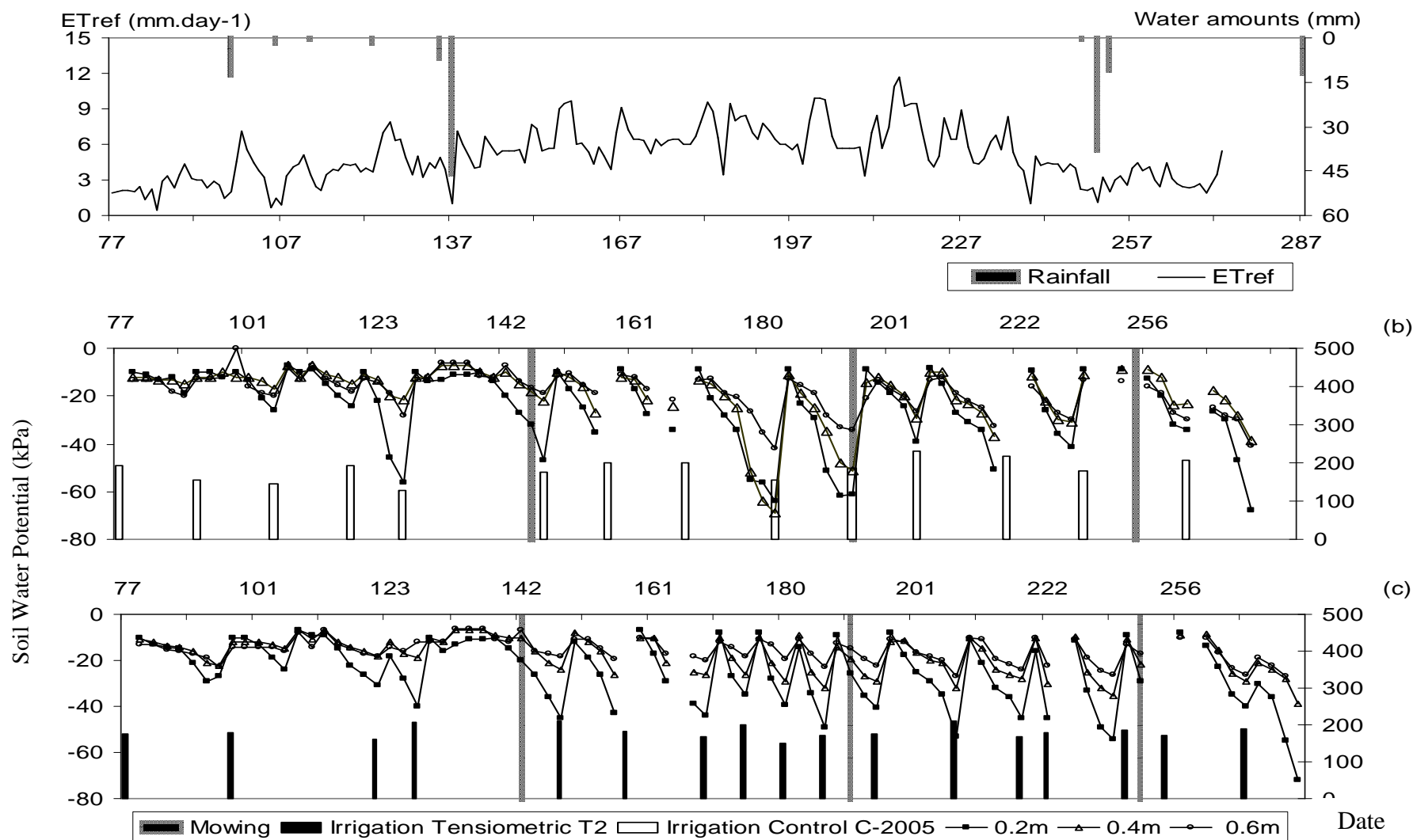


Fig. 3. Water amounts (Rainfalls and irrigation events) and daily Potential Evapo-transpiration (ET_{ref}) in 2005 (a). Irrigation scheduling (Control (b) and Tensiometric scheduling T2 (c)) from changes in soil water potential at 0.2, 0.4 and 0.6 m depth. Three growth periods ended by a mowing are presented.

Soil water content (θ_v): A typical dynamic of soil drying is shown in Fig. 1b. After an irrigation event, rehydration of the soil profile was complete down to a depth of 2.4 m whereas the rainfall often resulted in superficial rehydration. Between 2 water supplies, θ_v decreased in the upper soil layer, with crop water uptake and soil evaporation. Soil drying was then observed down to 0.5 to 0.7 m, corresponding to the pudding stone depth and the limit of the root system. Between 0.6 m and 2.4 m, the θ_{min} and θ_{max} reported for each access tube were not equal but very close and perfectly parallel. As shown above for the Ψ_{total} curves, the drainage below 0.6 m still occurred several days after each irrigation event, indicating that the θ_v were measured before the end of the drainage period and the soil was not at field capacity. θ_{max} was therefore slightly overestimated in this part of the soil profile and can be considered as equal to θ_{min} . We have therefore assumed that no crop water uptake occurred below 0.6 m and soil water consumption was calculated down to this depth.

Fraction of Transpirable Soil Water during the cropping season: θ_{max} and θ_{min} were calculated for each field in the root zone (0-0.6 m depth), as described above. θ_{fc} and θ_{min} (respectively 27.65% and 12.07% at 0.2 m, 28.40% and 11.73% at 0.4 m, 25.83% and 15.33% at 0.6 m) were used to calculate the upper and lower limits of TTSW in the first 60 centimeters of soil corresponding to extraction by the roots. At the beginning of the growing period, day 90 to day 130, the FTSW was fairly similar for the two irrigation treatments (Fig. 4). FTSW remained close to 90% for several days after each irrigation event and then followed a linear decline. In 2004, it twice fell below 60% in the two irrigation treatments (data not shown), but it remained above this value in 2005 (fig. 4). When climatic, the water deficit increased (after day 140), the FTSW declined on the first day after each irrigation event, and followed a linear decrease until the next irrigation. Although the dynamic was similar for all treatments, the minimum values remained above 50% for T2, but fell to 30% for Control (Figure 4) as well as for Control and T1 in 2004 (not shown).

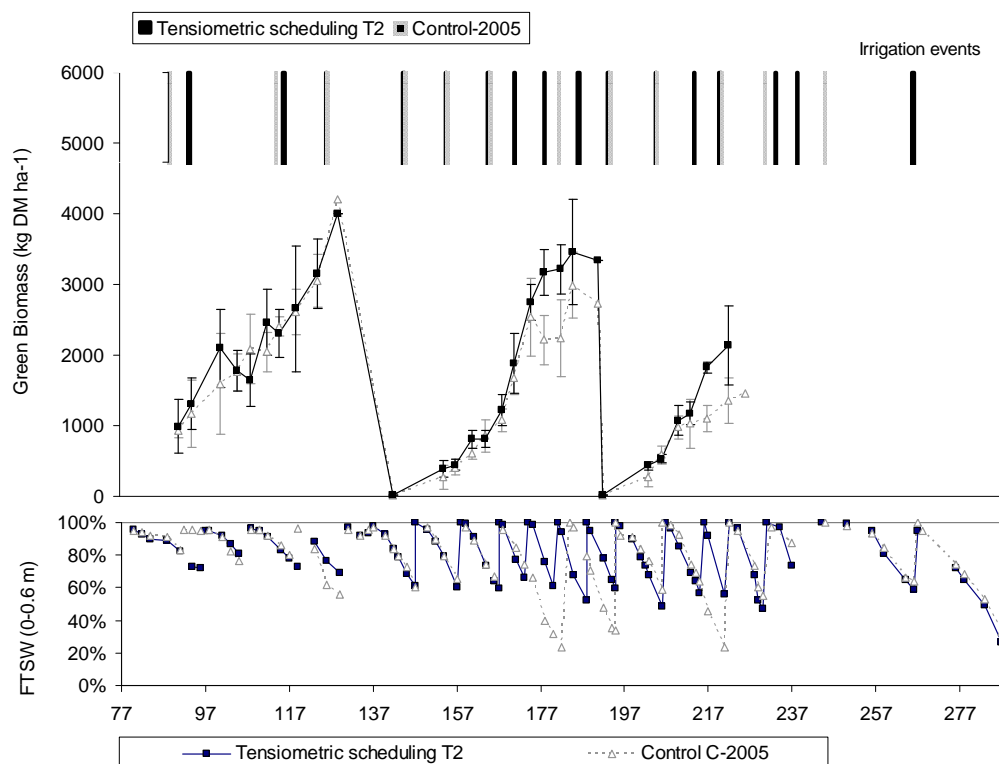


Fig. 4. Dynamic of green biomass (kg DM ha⁻¹) and FTSW along the cropping season in 2005. Closed symbols are for Tensiometric treatment (T2) and open symbols for Control. Means +/- confidence interval 5%.

Crop production

Herbage yield and Water Use Efficiency (WUE): In 2004, Control gave higher yields than T1 (Table 2) and reached the regional yield level (8 T ha⁻¹). Its greater yield over T1 increased with the number of mowings during the growing season. A reverse trend was observed in 2005, with higher yields for the Tensiometric scheduling (T2) than for Control, at least for the 2nd and 3rd mowing. In both years, the level of the treatment relative to yield was consistent with the level of water consumption (ETa in table 1), but the WUE tended to decrease with the decreased water supply (table 2).

Table 2: Yields and Water Use Efficiency (WUE) of Control and Tensiometric scheduling (T1 and T2) treatments, during two years and on two fields (A and B).

Field	Year	treatment	Total Yield (T DM ⁻¹ ha ⁻¹)	Yield 1st mowing (T ha ⁻¹)	Yield 2nd mowing (T ha ⁻¹)	Yield 3rd mowing (T ha ⁻¹)	WUE* (kg ⁻¹ ha ⁻¹ m ⁻³ water)/Ea
A	2004	Control	8.1	3.4	3.3	1.4	1.49
		T1	6.5	3.7	2.1	0.7	1.20
	2005	Control	7.4	4.2	2.4	0.7	1.00
		T2	8.1	4.0	3.0	1.0	1.10
B	2004	Control	6.8	2.3	3.8	0.6	1.25
		T1	6.0	2.6	3.0	0.2	1.10
	2005	Control	5.7	2.8	1.9	1.1	0.82
		T2	7.5	3.5	3.2	1.4	1.08

* WUE was calculated for the whole season.

Herbage growth: Measurements of net herbage growth between two mowing (Fig. 4) identified the periods when the differences between the two watering systems occurred. As expected, from day 78 to day 150 in 2005, the average green biomass accumulation did not show a marked difference between Control and T2. In contrast, from day 150 until the 2nd mowing, plant growth significantly differed between the treatments in agreement with the water supply frequency. On day 175, the net biomass accumulation in the Control treatment stopped while it increased in T2. Despite a mild soil water deficit for just one week in Control compared to T2, its yield was 8 % below T2. In the 3rd cut period, the lower irrigation frequency of Control scheduling induced a stronger reduction of the net biomass accumulation rate compared to Tensiometric scheduling. The same results were observed in 2004 between T1 and Control treatments but the period without accumulation of green biomass was longer for T1 treatment, conforming to a shorter irrigation frequency. Growth was seen to stop every time

2nd and 3rd mowings, following a relationship to the FTSW (not shown) similar to that for the yield (Fig. 5a).

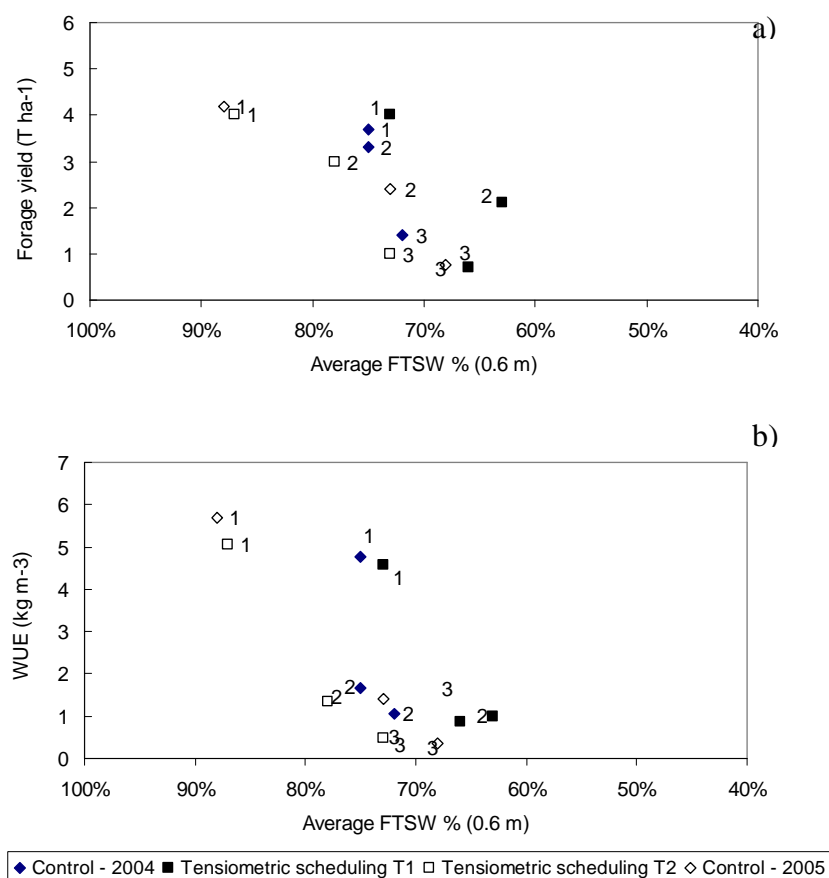


Fig. 5. Relationship between the average fraction of transpirable soil water (FTSW expressed in percent of TTSW) during a growing period, and forage yield ($\text{T DM}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) (a) or Water Use Efficiency (kg DM m^{-3}) (b). The numbers next to the points correspond to the order of mowing. WUE was calculated for each mowing.

Table 3: Contributions (in % of hay DM) of plants and botanical groups to the botanical composition of the hay at each mowing and for each treatment (Control in 2004 and 2005, Tensiometric scheduling T1 and T2). Significant results (* $P < 0.1$, ** $P < 0.05$) of the comparison between T and Control are underlined. n.m. indicates that no measurement was performed.

	1 st mowing				2 nd mowing				3 rd mowing			
	2004		2005		2004		2005		2004		2005	
	C	T1	C	T2	C	T1	C	T2	C	T1	C	T2
Grass	49	51	61	68	48	44	45	38	29	31	26	30
including Arrhenatherum	20	19	19**	32**	19	16	14	16	13	12	12	13
including Dactylis	n.m.	n.m.	15*	21*	n.m.	n.m.	8	3	n.m.	n.m.	10	11
including Lolium + Poa	n.m.	n.m.	26**	14**	n.m.	n.m.	23	18	n.m.	n.m.	3	3
Including Setaria	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0*	3*
Legumes	26	29	18	14	25	26	20**	36**	22	20	18**	36**
Others plants (Taraxacum officinale. Plantago lanceolata)	15	13	9	7	16	21	17	12	34	34	40**	23**
including Daucus carota	1	1	3	3	2	1	2t	5t	4	3	6	4
Senescent material	7	7	9	7	9*	7*	15**	9**	11	10	11**	6**

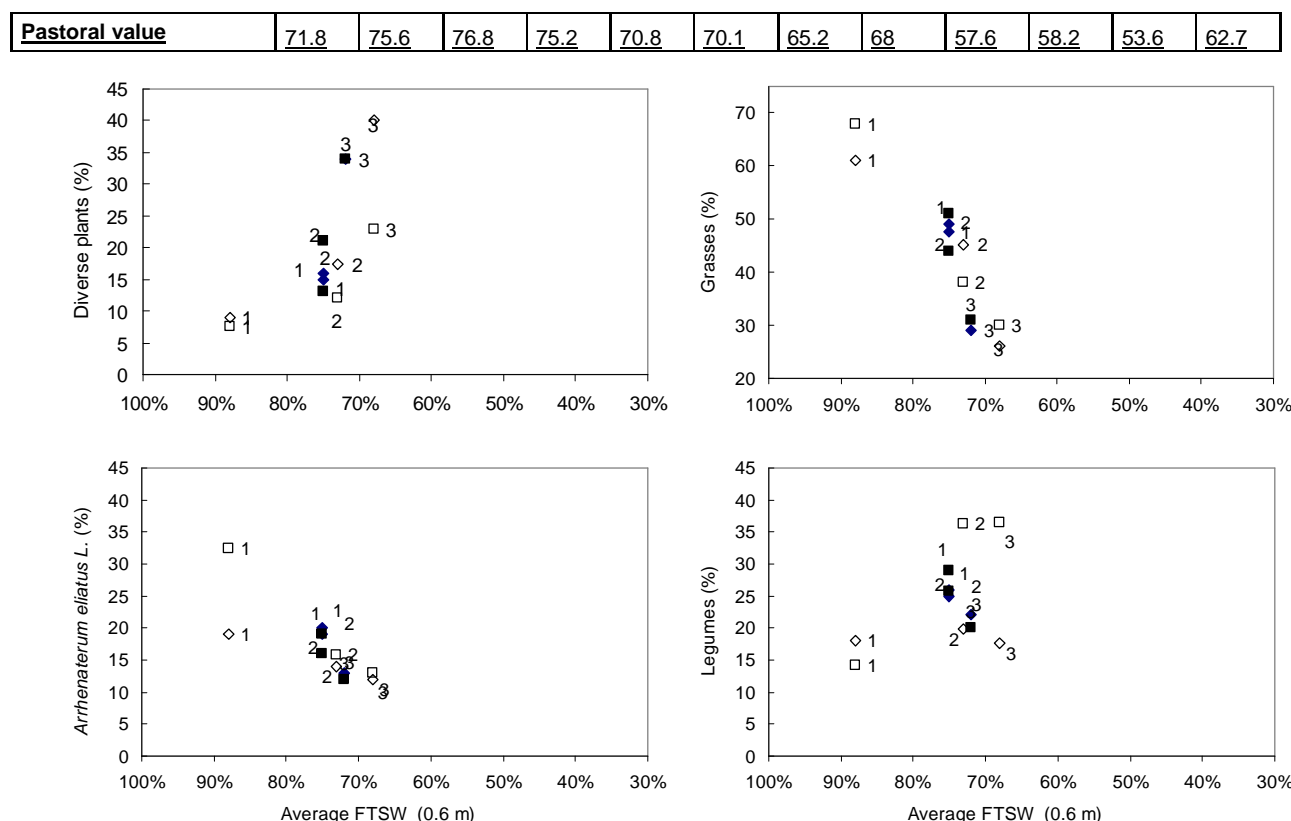


Fig. 6. Botanical composition (expressed in % of hay dry matter) of Diverse plants, Grasses, Legumes and *Arrhenaterum eliatius* as a function of the average value of the fraction of transpirable soil water (FTSW) during the growing period. The numbers next to the points correspond to the order of mowing.

◆ Control - 2004 ■ Tensiometric scheduling T1 □ Tensiometric scheduling T2 ◇ Control - 2005

Discussion

Plurispecific Crau grasslands are very sensitive to mild soil water deficits.

For every year and irrigation treatment, the average soil water potential (Fig. 2 and 3) and FTSW (Fig. 4) in the rooting zone remained at high levels during most of the first growing period (respectively above -50 kPa and 70%), suggesting that plant growth was not limited by the soil water deficit. Later on these indicators fell regularly below these values despite the massive amounts of water applied. Differences between irrigation treatments were observed both for these indicators and for herbage growth. Over the years and irrigation treatments, the average FTSW during the mowing period explains a large part of the herbage yield (Fig. 5a). The rate of accumulation of the above-ground biomass was stopped as soon as the FTSW fell below 60% (Fig. 4), which is a level not considered a severe water stress (Volaire and Lelièvre, 2001; Pellegrino et al., 2006). This indicates that these grasslands are very sensitive to the soil water deficit, which is a major limiting factor for hay production, despite the huge amounts of water supplied by border irrigation. This high sensitivity of the production function to the soil water deficit could explain why the Water Use Efficiency (WUE) was less with the FTSW (Fig. 5b), while the increase or stabilizing of the WUE is generally observed with a moderate water deficit (Wery, 2005).

The evolution of the botanical composition in plurispecific grassland during the growing season could be the result of the different physiological responses of plant species to variations of temperature (Volaire and Lelièvre, 1992). Our results show that this composition was also influenced by a moderate soil-water deficit (Fig. 6). A genotypic variation for sensitivity to the water deficit has been reported for grassland species (Kassioumi et al, 2002; Liancourt et al, 2005; DaCosta and Huang, 2006), but the behaviour of a mixture is difficult to predict since plant response to stress could be different when mixed (Lauenroth et al, 1978; Lelièvre and Desplobins, 1994). Genotypic differences in rooting depth probably had a minor impact in our conditions, since root development below 0.6 m

was impaired by the soil structure. The rapid evolution of the botanical composition when measured by the biomass of the various species could be explained in terms of the dominant functional groups (Liancourt et al., 2005). Addition or removal of water can change the water and nutrient competition between species and lead to the replacement of a few species by a subordinate species in conventional conditions (Lauenroth et al., 1978). A decrease of nutrient availability, especially nitrogen, is often observed with a decrease of water in the upper soil layer, and may have amplified the effect of the water deficit (Lemaire and Denoix, 1987; Kelly et al., 2003).

Implications for Regulated Deficit Irrigation (RDI) of flooded grassland on stony soils

Tensiometric scheduling, based on the gradient of the soil matric potential in the root zone, was applied successfully for border irrigation of plurispecific permanent grassland on stony soil. Despite the spatial variability of the soil water potential occurring in these conditions, there was good homogeneity and consistency between the five measurement sites in each field and the irrigation treatment. We managed to integrate the major water fluxes in the system (plant uptake and drainage). These are difficult to estimate in field conditions but required for sound management of irrigation in a sustainable development context. Good consistency was also noted between the soil water potential in the root zone and hay production or botanical composition. This is in line with current knowledge on the effects of soil drying on the basic plant functions such as transpiration, photosynthesis or leaf growth (Wery, 2005). In addition to its use for water flow management, the soil water potential can therefore be used as an indicator of the soil water deficit experienced by the plant community on plurispecific grasslands. However, due to the high sensitivity of the hay yield and quality to the soil water status, it will be difficult to save water in these grasslands without a reduction in the yield of this high value product on the Crau region.

Conclusion

The Tensiometric RDI proposed in this study was precise enough to decide on a rigorous approach to irrigation method while seeking a trade-off between increased productivity (T2 based on the tensiometry at a depth of 0.2 m) and reduced drainage (T1 based on the tensiometry at a depth of 0.4 m), in comparison with Control-type conventional irrigation management. Our results indicate that a RDI based on simulated FTSW could also be used on grassland as suggested by Wery (2005) for grain legumes and by Pellegrino et al. (2006) for vineyards. In respect to tensiometric measurements, this approach allows simulation of FTSW with a simple water balance (Pellegrino et al., 2006), in order to anticipate irrigation decisions for the various fields of a farm in conditions of limited labour and equipment.

Acknowledgements

A. Merot received funding from National Association for Technical Research and the Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale. The experimental domain of "Le Merle" (SupAgro) is gratefully acknowledged for providing the experimental fields. The reviewers are acknowledged for their detailed and useful comments.

References

- Allen, R.G., Pereira L.S, Raes, D., Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements . Irrig and Drain. Paper 56 FAO, Rome.
- Al-Faraj A., G.E. Meyer and G.L. Horst. (2001). A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making - a traditional method. *Comput. Electronics Agric.*, 31, 107-124.
- Cabelguenne M. and P. Debaeke. (1998). Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soyabean, sorghum and wheat. *Plant Soil*, 202, 175-192.
- Cuny H., Wery J. and Gaufres F. (1998). A simple indicator for diagnosing leaching risk below the root zone using Tensionic tensiometers. *Agron. J.*, 18, 521-535.
- DaCosta M. and B. Huang. (2006). Deficit irrigation effects on water use characteristics of Bentgrass species. *Crop Sci.*, 46, 1779-1786.
- Daget Ph. and P. Poissonet. (1971). Une méthode d'analyse phytoécologique des prairies. Critères d'applications. *Ann. Agron.*, 22(1), 5-41.

- Davies W.J. and W. Hartung. (2004). Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity? In "New directions for a diverse planet". Proc. 4th Int. Crop Sci. Congr., 26 Sept. – 1 Oct. 2004, Brisbane, Australia
- Deng X.P., L. Shan, H. Zhang and N.C. Turner. (2004). Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. In "New directions for a diverse planet". Proc. 4th Int. Crop Sci. Congr., 26 Sept. – 1 Oct. 2004, Brisbane, Australia
- Girona J., M. Mata, A. Arbonès, J. Rufat and J. Marsal. (2005). Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soil. *Agric. Water Manage.*, 72, 97-108.
- FAO-UNESCO. (1981). Soil map of the world – 1/5.000.000. Food and Agricultural Organisation, Rome.
- Isbérie C., A. Bensaoud, E. Lesage, & C. Lohou. (2004). Tensiometric Measurements : a Tool to Analyse Root Growth and to Schedule Irrigation of Landscape Trees. *Acta Horticulturae*, 664, 325-332 .
- Kassioumi M., D. Veresoglou and V. Noitsakis. (2002). Drought resistance and flowering phenology of five perennial grass species. Paper presented at the Multi-function grasslands : quality forages, animal products and landscapes. Proc. 19th General Meeting of the Eur. Grassland Federation, La Rochelle, France.
- Kelly K.B., C.R. Stockdale and Mason, W. K. (2003). The productivity of irrigated legumes in northern Victoria. 1. Effect of irrigation interval. *Austral. J. Exper. Agric.*, 45(12), 1567-1576.
- Kruger E., G. Schmidt, & U. Bruckner. (1999). Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae*, 81, 409-424.
- Lacape M.J., J. Wery, and D.J.M. Annerose. (1998). Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field Crops Rech.*, 57, 29-43.
- Lauenroth W.K., J.L. Dodd and Sims, P. L. (1978). The effects of water and nitrogen induced stresses on plant community structure in a semiarid grassland. *Oecologia*, 36(2), 211-222.
- Lecoeur J. and L. Guilioni. (1998). Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Rech.*, 57, 319-218.
- Lelievre F. and G. Desplobins. (1994). Pure lucerne or lucerne in association with grasses for extensive Pastures in dry northern mediterranean areas. In Management and breeding of perennial lucerne for diversified purposes., Proceeding of FAO-Eucardia Meeting, FAO/Rome, 89-92
- Lemaire G. and A. Denoix. (1987). Croissance estivale en matière sèche de peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans l'Ouest de la France. II. Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et nutrition azotée. *Agron.*, 7(6), 381-389.
- Liancourt P., E. Corcket and R. Michalet. (2005). Stress tolerance abilities and competitive responses in a watering and fertilization field experiment. *J. Veg. Sci.*, 16(6), 713-722.
- Marsal J., M. Mata, A. Arbonès, J. Rufat and J. Girona. (2002). Regulated Deficit Irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *Eur. J. Agron.*, 17, 111-122.
- Moutonnet P., J. Wery, & A. Bossy. (1981). Etude comparative de quatre dispositifs d'irrigation automatique: application au maïs irrigué en localisé. *Agricultural Meteorology*, 24, 275-289
- Oweis T., M. Pala and J. Ryan. (1998). Stabilizing rainfed wheat yields with Supplemental Irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agron. J.*, 90, 672-681.
- Pellegrino A., E. Gozé, E. Lebon and J. Wery. (2006). A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in a network of farmer's fields. *Eur. J. Agron.* 25: 49-59.
- Peyremorte P. (1984). Amélioration de la conduite des arrosages par des agriculteurs qui utilisent des tensiomètres. Les besoins en eau des cultures, Conf. Int., Paris, 11-14 sept. 1984, INRA, 809-821.
- Richards S.J. and A.W. Marsh. (1961). Irrigation based on soil suction measurements. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 65-69.
- Ritchies J.T. (1981). Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant Soil*, 58, 81-96.
- Sinclair T.R. and M.M. Ludlow. (1986). Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Austral J. Plant Physiol.*, 13(3), 329-341.
- Smeal D., M.K. O'Neill, and R.N. Arnold. (2005). Forage production of cool season pasture grasses as related to irrigation. *Agric. Water Manage.*, 76, 224-236.
- Tron G., C. Isberie and P. Chol. (2000). La Tensiométrie pour piloter les irrigations (Educagri ed.).
- Voltaire F. and F. Lelièvre. (1992). Améliorer les ressources fourragères en Corse : Bilan des recherches agronomiques (1985-1991): Station of San Giuliano.
- Voltaire F. and F. Lelièvre. (2001). Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant Soil*, 229, 225-234.
- Wery J. (2005). Differential effects of soil water deficit on the basic plant functions and their significance to analyse crop responses to water deficit in indeterminate plants. *Austral. J. Agric. Rech.*, 56, 1201-1209.

White S.C. and S.R. Raine. (2004). Identifying the Potential to Apply Deficit Irrigation Strategies in Cotton Using Large Mobile Irrigation Machines. In "New directions for a diverse planet". Proc. 4th Int. Crop Sci. Congr., 26 Sept. – 1 Oct. 2004, Brisbane, Australia

CHAPITRE IV

MODELISATION DU SOUS-SYSTEME BIOPHYSIQUE

– SOL-PLANTE-LAME D’EAU

IV. MODELISATION DU SOUS-SYSTEME BIOPHYSIQUE : SOL-PLANTE-LAME D'EAU

IV.1. Objectif et structure du chapitre

Après avoir analysé le fonctionnement du système biophysique et collecté les variables nécessaires (Chapitre III) nous passons ici à la modélisation numérique de ce système (Figure I.1) vu comme la combinaison d'un modèle d'avancement de la lame d'eau d'irrigation et d'un modèle sol-prairie. Les objectifs de ce chapitre sont :

- (1) de modéliser l'avancement et l'infiltration de la lame d'eau durant une irrigation et à l'échelle de la planche d'irrigation,
- (2) de modéliser la dynamique des variables clé du sol et de la plante au cours de chaque pousse : LAI, biomasse aérienne, état hydrique du sol, quantité d'eau drainée,
- (3) de coupler le modèle d'avancement et le modèle de culture.

Ce chapitre fait l'objet de deux articles :

Le premier est soumis à Irrigation Science. Il présente un travail d'adaptation d'un modèle d'avancement de la lame d'eau et d'un modèle de culture générique simplifié puis le couplage de ces deux modèles via le stock d'eau du sol et une relation entre le LAI et la rugosité. Le modèle de culture générique, basé sur une démarche plus empirique que fonctionnelle, a été choisi car il avait déjà été couplé de façon dynamique au modèle d'avancement de lame d'eau dans sa forme originelle. Ceci a permis d'avancer en attendant d'avoir évalué le modèle de culture en construction (cf ci-dessous) sur des bases plus fonctionnelles que le précédent.

Le deuxième article sera soumis prochainement. Il reprend l'aspect modélisation de la culture sous un angle fonctionnel permettant de prendre en compte plus précisément les spécificités de la prairie comme la composition floristique variable à chaque coupe (et donc le potentiel de rendement). Il se base sur le concept d'efficacité de conversion du rayonnement en biomasse (Radiation Use Efficiency, RUE) sous contrôle de l'état hydrique du sol, des températures élevées et d'un effet ontologique (variation du RUE maximum selon le cycle de croissance au cours de la saison). Une méthode d'optimisation des paramètres a été développée pour paramétrer ce modèle. Cet article présente l'ensemble de la démarche de

modélisation depuis l'adaptation de la structure, jusqu'à l'évaluation du modèle en passant par l'optimisation des paramètres. Ce modèle prendra la place du précédent dans la suite du travail.

IV.2. Dispositif expérimental de collecte des données pour le paramétrage des modèles

Le travail d'expérimentation présenté dans le chapitre précédent nous a permis de constituer une base de données sur les variables d'état, les variables de flux et les performances du système biophysique (Figure I.1)sur laquelle nous nous appuyons dans ce paragraphe. Le dispositif expérimental est donc identique à celui du chapitre précédent. Les données ont été collectées de 2004 à 2006 dans deux parcelles représentatives des prairies de Crau en termes de sol, composition floristique, rendement et pratiques. Sur chacune de ces deux parcelles, deux conduites d'irrigation ont été appliquées.

Des mesures complémentaires ont été effectuées dans le but de modélisation notamment pour initialiser les modèles (indice foliaire et biomasse en sortie d'hiver puis après coupe).

IV.3. Modélisation de l'avancement de la lame d'eau et couplage avec un modèle de culture

IV.3.1. Objectifs et démarche

L'objectif de cette modélisation est d'évaluer l'impact de modifications des conditions d'irrigation (débit, pente, longueur, largeur, sens d'arrosage, fréquence) sur les performances agronomiques de la prairie et les performances hydrauliques des arrosages (pertes par drainage hors de la zone racinaire, pertes en colatures uniformité d'application).

Le couplage entre le modèle d'irrigation et le modèle de culture (Mailhol et al., 2005) se fonde sur l'échange de variables simulées au cours du cycle telles que le profil des doses infiltrées amont-aval de la planche d'irrigation (entrée du modèle de culture), le déficit de saturation avant arrosage (entrée du modèle d'irrigation) ou encore sur la relation entre LAI et rugosité (entrée du modèle d'irrigation). Afin de tenir compte de la variabilité amont-aval de

la dose infiltrée, chaque planche est divisée en sous-unités de 10 m de long sur lesquelles fonctionne le modèle de culture.

Nous cherchons à représenter les principales caractéristiques du sous-système biophysique (Figure I.1). Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la prairie est sensible au déficit hydrique. Par ailleurs, l'infiltration est importante dans le type de sol caillouteux considéré ce qui entraîne une recharge conséquente de la nappe. Les temps d'irrigation sont variables d'un arrosage à l'autre, pour partie due à la rugosité qui varie en fonction de la hauteur de végétation et pour partie due au dessèchement du sol variable.

IV.3.2. Méthodologie

IV.3.2.1. Les adaptations réalisées au modèle SIP (Simulation Irrigation Prairie)

Le modèle SIP simule l'avancement de l'eau dans une planche d'irrigation, la durée d'irrigation et la récession de l'eau. Les variables de sortie (Figure I.1) sont les doses infiltrées le long de la planche et l'efficacité hydraulique (uniformité d'arrosage, efficacité d'arrosage et pertes en colature). Le modèle d'irrigation se présente sous la forme d'un couplage d'une loi d'avancement de l'eau associée à une loi d'infiltration. Pour l'infiltration, SIP est basé sur la forme prédictive du modèle de Horton (Mailhol, 2003; Mailhol et al, 2005). Pour l'avancement le long de la planche, le modèle SIP utilise l'équation de l'onde cinématique (solution simplifiée de St Venant) plus facile à mettre en œuvre que la solution complète de St Venant ou celle du « zéro inertie. Tenant compte de la gamme de pente ($0.2 < S_0 < 0.25 \%$) pour lesquelles le modèle est appliqué, cette équation s'avère bien adaptée bien qu'elle ne permette pas de simuler la phase de déplétion⁸ (définie au chapitre I). Un calcul empirique artificiel de cette phase de l'arrosage est donc ajouté d'après la formulation proposée par Walker (2003).

Nous avons aussi proposé une relation entre le LAI et la rugosité de façon à tenir compte de la dynamique du paramètre de rugosité en fonction du temps.

⁸ la déplétion est la troisième phase de l'irrigation par ruissellement. Cette phase commence à la coupure de l'apport en eau en entrée de parcelle et dure jusqu'au moment où l'eau commence à disparaître en amont de la planche (récession).

IV.3.2.2. Paramétrage de l'avancement

La méthode de travail pour le paramétrage du modèle SIP a comporté deux étapes :

- (i) Une première étape de ajustement puis validation des paramètres par rapport à une variable de sortie - l'avancement de l'eau. Les données collectées sont séparées en deux lots. Le premier, correspondant au jeu de données le plus complet et régulier (dernière année de mesure), sert à caler par tâtonnement 2 paramètres d'infiltration (la longueur capillaire λ_c et la conductivité hydraulique à saturation K_s) ainsi que la relation entre le LAI et la rugosité. La relation entre la rugosité et la variable d'état du système LAI est proposée à partir d'une valeur maximale observée dans la littérature et calée pour des arrosages effectués dans les mêmes conditions de LAI. Le deuxième lot est utilisé pour valider les paramètres. Deux critères sont calculés pour évaluer la qualité du calage : le Root Mean Squarre Error (RMSE) et l'efficience de modélisation (EF ou critère de Nash).
- (ii) En raison de l'absence de mesures pendant la phase de récession⁹ et de mesures d'infiltration, les résultats sont ensuite confrontés aux résultats du modèle SIRMOD III (Walker, 2003), qui fait office de référence en matière de simulation de l'avancement de l'eau en irrigation gravitaire. Une première comparaison des trajectoires d'avancement, déjà validées pour SIP, montre que les résultats des deux modèles sont très proches. Les simulations de la récession, de l'infiltration et des pertes dans les fossés de colature sont aussi comparables, ce qui permet de valider le modèle SIP pour l'ensemble des variables de sortie.

IV.3.3. Résultats

IV.3.3.1. La simulation de l'avancement

Les simulations du modèle nous donnent des résultats satisfaisants pour la variable vitesse d'avancement. Dans chaque situation testée, l'efficience de modélisation (Wallach et al., 2006) relative à la trajectoire d'avancement est supérieure à 0.97. Le calcul de l'erreur de prédiction moyenne RMSE montre que les erreurs de simulation sont faibles : au maximum égale à 22' pour un temps d'avancement de 470' soit 4.7% d'erreur. L'approche de la rugosité

⁹ la récession est la quatrième et dernière phase de l'irrigation par ruissellement. Cette phase commence lorsque l'eau commence à se retirer en amont de la planche (récession).

au travers de la relation LAI-Manning est validée sur des données provenant de deux planches d'irrigation très différentes en termes de végétation.

Les résultats d'avancement et de pertes en colatures se révèlent très proches de ceux obtenus avec SIRMOD III pour l'arrosage test. Ces observations montrent la cohérence des résultats des simulations de SIP. L'approche de modélisation est donc validée pour ces deux critères. Pour l'évaluation des pertes en colature, les deux modèles SIRMOD III et SIP ont donné des résultats similaires mais différents de 50% environ des données mesurées (6% simulées contre 13% mesurées). Ceci nous a conduits à nous interroger sur ces mesures de colature notamment quant à leur origine de cette eau de colature (ruissellement pur ou drainage de surface ?). Compte tenu que ces pertes en colatures sont généralement faibles, l'alimentation étant coupée bien avant que le front n'atteigne l'aval de la parcelle justement pour réduire ces pertes, cette erreur de simulation ne devrait pas avoir d'impact sur le bilan des flux d'eau.

IV.3.3.2. Couplage du modèle d'avancement avec un modèle de culture : le modèle SPFC

Les deux modèles ont été validés¹⁰ indépendamment l'un de l'autre, la question de la validation du couplage s'est donc posée. L'hétérogénéité du rendement, le long de la planche d'irrigation en fonction de l'hétérogénéité des doses apportées, a été proposée comme le principal critère d'évaluation de ce couplage (Mailhol et al., 2005). Cependant, l'arrosage permettant à chaque fois de remplir la réserve en eau du sol sur l'ensemble de la planche d'irrigation, aucune hétérogénéité ne peut être utilisée pour valider ce couplage. La simulation des pratiques observées (dates et débits d'irrigation et date de coupe) à l'échelle du cycle peut constituer une validation.

Après validation, le modèle SPFC est utilisé sur le scénario climatique 2005 pour tester quelques stratégies d'irrigation et illustrer l'utilisation potentiel du modèle :

- (1) les irrigations sont déclenchées sur la base d'un déficit hydrique du sol de 50%. Le modèle couplé met en évidence une diminution du nombre des irrigations entraînant une baisse des rendements.
- (2) un changement du sens de l'irrigation dans une parcelle est aussi envisagé (passage d'une planche de 450 m de long à deux planches de 225 m de long). Les irrigations

¹⁰ Nous ne présenterons pas ici l'adaptation, le calage et la validation du modèle de culture.

sont déclenchées sur la base d'un déficit hydrique du sol de 50%. Le modèle montre qu'il est possible d'économiser de l'eau.

IV.3.4. Article: SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region

SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region

Jean Claude Mailhol¹¹ and Anne Merot¹²

Abstract

This article deals with the development and application of SPFC, a model to improve water and grassland production (HC) in the Crau region (SE of France). This model is composed of two sub-models: an irrigation model and a crop model. As the fields are border irrigated, these two sub-models are coupled. The crop model simulates the dry matter, the Leaf Area Index (LAI) and the soil water reserve (SWR) variations. LAI and SWR are both involved in border model updating: SWR for the deficit of saturation required by the infiltration equation and LAI for the roughness coefficient n . After calibration and validation, SPFC is then used to identify realistic management strategies for the irrigation and production system at the plot level. By dividing the border length by two and by scheduling irrigation when SWR is at 50% depleted, a low Dry Matter DM production loss (around 10%), a man power reduction (8 irrigation events instead of 11) and in a significant water saving would be obtained, on the basis of an average climatic scenario. Furthermore, this improvement of irrigation efficiency is not incompatible with groundwater recharge.

Key words

Border irrigation, grasslands, Water balance, irrigation model, crop model, coupling models

Introduction

In the Crau region (in the Southern France), the primary ecosystem is a semi-arid steppe with high climatic water deficit from April to August and no natural superficial rivers (Boutin and Cheylan, 2004). Water transfers from the Alpes Mountain through the Durance River allow the development of multi-specific and permanent grasslands which are the basis of local agriculture. These grasslands, sensitive to water stress (Merot et al., 2007), are used for hay production: 'Crau hay' with a label of Certified Origin Product (COP).

They are irrigated using the border system on soils having a water retention capacity strongly reduced by the presence of boulders which enhance the soil macro-pore effect on infiltration. Under such soil conditions, the required times (or cut-off time) to irrigate an average plot length of 450 m can overreach 8 h. Even if water is cut-off before reaching plot end, in order to limit runoff losses, a great water amount (close to 60% of the water applied) is lost by percolation which recharges the superficial groundwater. The latter supplies the water requirements of near two hundred thousand people. Moreover, the groundwater recharge and the water that flows in the numerous open earth channels contribute to the ecosystem equilibrium. The Crau region is generously supplied by the Durance river from the Serre Ponçon dam (30 m³.s⁻¹ of water rights for an irrigated area approaching 33 000 ha) and, consequently, water saving is not a priority yet. Nevertheless, the share of the Durance's flow is currently under discussions consequently to the acknowledgement of new water users and the best taking into account of the ecological context of the river (Balland, 2002). Thus farmers are encouraged to limit their water consumption. In the present context, a field is

¹¹ UMR G-EAU (CEMAGREF-ENGREF-CIRAD-IRD), Cemagref - 361, rue J.F. Breton - BP 5095 - F34033 Montpellier – France.

¹² UMR System (Agro.M-CIRAD-Inra) - bâtiment 27 - 2 Place Viala - 34060 Montpellier Cedex 2 - France.

irrigated 15 times in average cumulating a water application close to 24000 m³/ha, the hay yield ranging from 8 to 10 T/ha. Changing surface by sprinkler irrigation would eliminate the beneficent role played by surface irrigation in the groundwater recharge and ecosystem preservation. Moreover, such a project is not conceivable for most of the farmers both from an economical and technical point of view (high windy conditions). In addition to water savings, farmers are confronted with a labour issue: irrigation is strongly time-consuming. During a half-year, 24h/24h, farmers have to distribute water all around every fields of the farm. Thus, a question that often rises is how the Crau Hay production could be improved, in the meaning of water and labour saving, without a fundamental modification of the cropping system?

Since modelling is often used to solve this sort of problem, this work is devoted to the development of a modelling approach allowing the test of different functioning scenarios of a system composed of fields and borders. The latter can refer to field disposition along a canal, their respective size and water supply system, the whole being subject to technical and climatic constraints. A Decision Support System (DSS) composed of a whole of action rules among which the water allocation priority or the mowing management, constitutes the basis of the modelling used for water management and hay production at farm level.

In this paper, our objective is limited to the development of a model usable to test the impact of a decision rule on the hay production at the plot scale. These decision rules can refer to the irrigation (irrigation scheduling, irrigation timing, discharge and cut-off time, and plot sizes) and mowing management.

In order to achieve this objective, we propose to elaborate two types of models. An irrigation model, that estimates the water application depth profile for an irrigation event, and a crop model, that predicts the water balance and the hay yield along the season. Due to their inter-dependence (outputs of one's being inputs of the other and vis et versa), these two models have to be coupled.

Material and methods

The experimental field context

Experiments were carried out in two typical multi-specific and permanent grasslands (A : 450 m long, 45 m large, slope of 2.9‰; B: 325 m long, 33 m large, slope of 2.5‰) of the Crau plain under a windy Mediterranean climate for 3 years (2004 - 2006) during the growing period. The soil of the two fields is a calcic luvisol (FAO, 1981) with an irrigric upper horizon (5% stones), over an intermediate layer of loamy sand (from 15% to 75% rocks) and a petrocalcic horizon. The upper layer is 0.1 to 0.4 m thick and the pudding stone is at a depth of 0.5 to 0.7 m. Roots are concentrated in the upper 0.3 m and root density decreases rapidly until the pudding stone which is water permeable but does not allow root growth.

These two grasslands were divided in two irrigation borders (A₁ and A₂ – B₁ and B₂) instrumented with five measurement stations regularly installed from upstream to downstream to take into account soil and irrigation heterogeneity. Fields A and B were irrigated approximately during 7 months at a frequency varying in average between 7 to 12 days. Pasture contributes to the organic fertilisation, a complement being provided by a potassium and phosphorus application at the beginning of the irrigation season at a rate of 150 kg/ha.

Data collection

Weather measurements:

Rainfall (P), average air temperature (T), relative humidity, daily global radiation (S) and wind speed (V) were measured by a weather station located in the experimental site. These 4

variables are used to calculate Penman Potential Evapotranspiration (ET_0) which is particularly well adapted to the windy conditions of the Crau (Petit, 1981).

Irrigation monitoring:

Two Parshall flumes were used to measure inlet discharge and runoff. The height of water in the Parshall flumes was provided using water-level probes. The flow rates calculated as a function of water level head was continuously recorded by a data logger every 15 minutes. Inflow rate was constant (field A: 140 L/s; field B: 150 L/s) throughout each irrigation event with negligible variation between irrigation events. The control of inflow and outflow rates allowed the assessment of inlet and outlet discharges respectively. Nevertheless, the reliability of runoff measurements is questionable due to the fact that the ditches devoted to evacuate runoff, play also the role of drainage ditches. Indeed, one can often notice the presence of water before the advancing front reaches the end of the plot. As outlet discharge is automatically measured (often during the night), it is not possible to separate the amount of water resulting from the sub-surface drainage to that resulting from run-off.

The advance trajectory of the water front was monitored during some irrigation events along the three years. During the water supply, the advancing front positioning was obtained with a Global Positioning System (GPS). The recorded data was processed with specific software associated to the GPS.

Water status monitoring and soil parameter assessments:

Volumetric Soil Water Content θ was measured with a neutron probe inserted in aluminium access tubes. Before and after irrigation, measurements were performed every 0.1 m until 1 m depth and every 0.2 m from 1 m to 2.4 m and repeated for five stations regularly disposed from upstream to downstream of the border.

According to the Lacape et al. (1998) approach, two particular values were estimated from neutron probe measurements. Average soil water content at field capacity (θ_{Fc}) and Minimum soil water content (θ_{min}) were determined in these grasslands over the soil depth explored by the roots (Merot et al., 2007). The value of θ_{min} was identified in 2004 on the A₂ border. A value of 0.28 and 0.12 was assigned to θ_{Fc} and θ_{min} respectively for the layer 0-70 cm, when lower values $\theta_{Fc} = 0.25$ and $\theta_{min} = 0.15$ were affected to the layer 70-100 cm.

Saturated Water Content (θ_s) was deduced from neutron probe measurements performed just after the end of depletion phase in the upstream part of A₁. An average value of 0.4 is adopted for this soil parameter.

The Soil Water Fraction which can be Potentially Transpired was evaluated from on one meter depth by:

$$PFTSW = \frac{\int_0^{z=1m} (\theta_{Fc}(z) - \theta(z)) dz}{\int_0^{z=1m} (\theta_{Fc}(z) - \theta_{min}(z)) dz} \quad (1)$$

A close comparison between the dynamic over time of FTSW and the dynamic of herbage growth leads to the evaluation of the ratio between the easily usable reserve (EUR) and the usable reserve (UR) : $EUR/UR = Kr$. A Kr value of 0.3 was found in 2004, 2005 and 2006 (Merot et al., 2007). The presence of boulders is at the origin of this low value generally set at 0.6 for most of soils, Kr ranging from 0.2 to 0.7 according to Doorenbos and Kassam, (1979).

Plant status monitoring:

Two optical measurements were performed in order to assess LAI values. Until the herbage reached the averaged height of 0.15 m, at the beginning of the cropping season and just after a mowing, LAI was evaluated indirectly by the study of gap fraction analysis (Breda, 2003 ; Jonckhere et al., 2004). This evaluation was performed using a hemispherical photography (fisheye lens, Nikon). Five replicates of 10 photos were realised above canopy. Then, these numerical photos were processed with the software Can-eye (Weiss, 2002).

When the herbage reached 0.15 m, the plant canopy analyser (Model LAI 2000 – LI-COR – precision 15%) was used to determine LAI by comparing differential light measurements above and below canopy. A series of 10 measurements was performed below canopy and compared to a reference measurement above canopy (Welles, 1991). Five replicates were made for each date of measurement. The dry matter (DM) evolution was measured every twice a week for each border, on subplots of 0.18 m² cut at 0.02 m aboveground using a small clipping machine. Each sampling was dried at 60° C for 75 h to assess its dry matter.

The variation coefficients for LAI range from 4 to 20%, the median value being of 12%, when those of DM range from 5 to 30%, with a median value of 16%.

Modelling approaches

SIP: a border irrigation model for the prediction of a water application depth WAD profile.

To make simple, the border model utilised in this study is based on the kinematic wave equation:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q(\tau) \quad (2)$$

, associated to the dynamic equation reduced to

$$S_0 = S_f = n^2 Q^2 / (A^2 R^{4/3}) \quad (3)$$

, for the surface flow, where A = cross section flow, Q = discharge, t = current time, q = infiltration rate, τ = opportunity time, S_0 = slope of the border, S_f = friction slope, n = roughness coefficient, R = hydraulic radius. The numerical solution of these two equations set is based on the moving deformable control volumes method resulting in a computational net in the x-t plane. The latter is composed of oblique cells that enhance accurate numerical solution. This numerical scheme was initiated by Katapodes and Strelkov (1977) and widely used by many other specialists of surface irrigation (Walker and Humpherys, 1983; Rayej and Wallender, 1985; Walker, 1999; Walker 2003).

The Kinematic-Wave Model (KWM) does not consider the depletion phase, but according to Walker and Humpherys, (1983), an artificial depletion phase can be added. In SIP, depletion is calculated using the formulation proposed by Walker (2003) in his guideline on SIRMOD III (page 76). This formulation allowing the estimation of the depletion phase duration (DPD), takes into account inlet discharge Q_{in} , n, S_0 , stabilised infiltration rate, and furrow length. This DPD is added, according to a spatially distribution, on the recession phase simulated by KWM. It is assumed to exponentially decrease from DPD at $x = 0$ to 0 at $x = x_d$, with respect to an acceptable mass conservation criterion. The latter reaching around 2.5% when DPD is not taken into consideration to 1.5 % or less when DPD is added.

The subsurface flow is governed by the predictive form of Horton's infiltration equation (Mailhol, 2003; Mailhol et al., 2005).

$$I(\tau) = \lambda c \Delta \theta [1 - \exp(\chi K_s (\lambda c \Delta \theta)^{-1} \tau)] + K_s \tau \quad (4)$$

, with $I(\tau) = \int_0^{\tau} q(t)dt$, and where λc = capillary length, $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$, K_s = saturated

conductivity and χ an empirical parameter governing the macro-pore effect at early stage of infiltration. The greater χ the faster water fills macro-porosity, the importance of macro-porosity being, in addition, directly linked to the linear character of the front advance trajectory (Mailhol and Gonzalez, 1993; Mailhol et al. 1999). It is interesting to take into account the predictive character of the infiltration equation via the saturation deficit $\Delta\theta$ which impacts on the advance process as further shown. The coupling with the crop model will result in a tool for water and yield management at the plot and season scale as proposed in Mailhol et al., (2005).

PILFC: a daily time-step model to simulate water balance and Hay Crau (HC) production

When dealing with the problem of the multi-specific grassland growing, a model based on morphogenetic processes (Calvière et Duru, 1995) is not easy to elaborate, due to the presence of different species. In the perspective of model coupling, a global approach is adopted. Instead of considering groups of species, each one having its proper functioning process, grassland is considered as a unique crop. Because of the lack of modelling to simulate the multi-species evolution of grassland, PILFC, an operative modelling approach partially based on the PILOTE model (Mailhol et al., 1997, Mailhol et al. 2004) concepts is developed. The environmental aspect linked to nitrogen leaching being not considered in the frame of this work, the water transfer through the soil-plant system will play the major role in this modelling approach.

PILFC gathers a soil module and a plant module respectively to simulate the water balance and the HC herbage growth.

The soil module of PILFC :

The PILFC soil module allows water balance and water stress index (WSI) estimations. It requires daily climatic data such as precipitations P , reference evapotranspiration, ET_0 , solar radiation S and average temperature T . It is composed of three reservoirs (R_1 , R_2 and R_3) in order to account for different soil water transfer processes and soil variability with depth. As in PILOTE model (Mailhol et al., 1997; Mailhol et al., 2004), a shallow reservoir R_1 having a depth Z_1 set to 0.1 m, governs flux exchanges with atmosphere. The depths of R_2 and R_3 are ruled by the variability of the soil properties, the cumulative depths $Z_r = Z_1 + Z_2 + Z_3$ equating the maximal root depth of the plant system. The PILFC soil module differs from that of PILOTE only by the transfer processes involving the two subsequent reservoirs, PILOTE soil module, unlike to this one, having a soil water reserve varying with root depth.

Soil evaporation E_s , is assumed to be only provided by the shallow reservoir R_1 according to $E_s = (1 - C_p)ET_0$, where C_p is the partitioning coefficient linked to the leaf area index (LAI): $C_p = 1 - \exp(-0.65LAI)$. The C_p is used to calculate potential transpiration $T_p = C_p.MET$ with maximal evapotranspiration $MET = K_c.ET_0$. The crop coefficient K_c is calculated from $K_c = K_{cx} [1 - \exp(-LAI)]$.

As long as possible, water is taken in this reservoir, supplied by rainfall and irrigation. It drains (d_1) in a second one when the soil water content overreaches the threshold value $R_{1sup} = (\theta_{Fc1} - \theta_{min1})Z_1$. The water balance corresponding to this first reservoir is given by:

$$R_1(j) = R_1(j-1) + P(j) + Irrig(j) - T_p(j) - E_s(j) - d_1 \quad (5)$$

, With $d_1 = \max \{ [R_1 \text{sup} - R(t)] ; 0 \}$, the amount of water percolated from R_1 at the end of the day j . When R_1 can partially supply the water demand then:

$$Es(j) = (1 - Cp)[R_1(j-1) + P(j)] \quad (6)$$

$$Tp_1(j) = Cp[R_1(j-1) + P(j)] \quad (7)$$

, and the lack: $(-R_1(j))$ to satisfy the water demand, is taken from the second or the third reservoir, partially or totally, depending of their respective water contents.

When R_1 is empty at the beginning of the time step: MET is taken in the subsequent reservoirs (R_2 and/or R_3) based on the principle that plant tries to transpire at the maximal rate (i.e. at MET).

Plant water uptake rate in a reservoir R_i ($i > 1$) depends on its water content level. As long as there is water in the easily usable water reserve defined by $R_{iEu} = Kr.(\theta_{Fci} - \theta_{mini})Z_i$ the reservoir can supply water at the MET rate. When water is uptake in the surviving reserve: $Rs_i = (1 - Kr)(\theta_{Fci} - \theta_{mini})Z_i$ actual transpiration decreases according to :

$$ATp_i = \min \{ 1. ; R_i/Rs_i \} MET \quad (8)$$

When R_2 cannot supply this rate, the part of MET (or the totality) not satisfied, is taken, when possible, in R_{3Eu} . When MET can only be partially provided by R_2 (i.e.: $\max\{0., R_2(j-1)\}$) and that R_3 cannot provide the rest $= -R_{2Eu}$, the latter is taken with the linear reduction in Rs_2 . In that case, $ATp_2 = R_2(j-1) + R_{2Eu}R_2/Rs_2$.

Depending on their soil water status the contribution of the different reservoirs in the total AET is: $TAET = Es + Tp_1 + ATp_2 + ATp_3$. Of course d_1 supplies R_2 and d_2 R_3 if their water content overreaches their field capacity, when d_3 is considered as deep percolation or drainage loss.

The plant module of PILFC:

As in PILOTE model, crop production is based on the LAI simulation obtained from Eq (9) in which RGSI, a stress index regarding the lack of radiation, has been introduced to account for the radiation impact on the HC production:

$$LAI(j) = LAI_{\max} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^j TT(k)}{t_m} \right)^\beta \exp \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^j TT(k)}{t_m} \right)^\alpha \right) \right\} \right] RGSI - (1 - WSI^\lambda) + LAI_0 \quad (9)$$

, where $TT(j) = \sum_{k=1}^j T(k)$, is the cumulative daily average temperature from the simulation

starting, at the winter exit or from each mowing. Maximal LAI value LAI_{\max} , is reached at the cumulative temperature t_m . These two parameters are plant characteristics and can be drawn from literature for most crops. The initial LAI value, LAI_0 , is either the value at winter exit or that observed after each grass mowing. Under those circumstances, the initial LAI value equals the minimal LAI one's namely LAI_{\min} . The shape factors α and β are empirical parameters calibrated on a full irrigated treatment. As explained in Mailhol et al., (1997), α takes two values, α_1 when $t_m > TT(j)$ and α_2 when $TT(j) > t_m$. The water stress index, WSI, accounts for a soil water deficit on grass production. It is expressed as a function of the ratio

$\sum_{k=j-10}^{k=j} \frac{ATp(k)}{Tp(k)}$ calculated on the basis of a moving average of 10 days as in PILOTE. The λ

parameter attests of plant sensitivity to water stress. The RGSi index is calculated according to $RGSi = \min\{1, \sum_{k=j-10}^{k=j} \frac{S(k)}{S_{opt}}\}$, where S_{opt} is a daily radiation value under which LAI, can be affected.

The dry matter calculation principle, although based on concepts near from that of PILOTE, is significantly different. As in PILOTE, the dry matter accumulation, Y_a at a daily time step, is calculated from $S(j)$, the daily incident solar radiation ($J m^{-2}$), multiplied by $I(j)$, the fraction of intercepted radiation estimated by an exponential function of LAI, and at last by RUE, the radiation use efficiency:

$$I(j) = 1 - \exp(-k.LAI^*(j)) \quad (10)$$

Using an extinction coefficient $k = \min(1.0, 1.43 \times LAI^{*-0.5})$, where LAI^* , is the LAI value calculated with no stress. But in this model version, the result, $Srg(j) = S(j) \cdot I(j) \cdot RUE$, is multiplied by $Rp(j) = CLAI/CLAI^*$, the ratio between two cumulative leaf area index values on 3 days preceding the j day. This formulation differs from that of PILOTE where this ratio is calculated within a critical period defined by two temperature threshold allowing the correction of the cumulative potential dry matter between sowing and maturity by Rp .

In the PILFC model, dry matter accumulation starts on the beginning of February where temperatures are often near zero degrees Celsius. Thus, LAI starting coincides with that of dry matter accumulation. The latter stops when cumulative temperature $TT(j)$ reaches a threshold value T_{mat} , corresponding to the end of flowering, or when a mowing occurs earlier the production plateau. This parameter T_{mat} , which corresponds to maturity, is not much higher than t_m at the opposite of crops such as corn or wheat for instance.

At this point, two factors specific to local conditions have to be taken into account to model the HC production. The first factor is governed by peculiar climatic conditions occurring when high temperatures match heavy windy rates (Allen et al., 1998). Affecting the radiation use efficiency RUE, these conditions can reduce the HC production from 10 to 15% according to advice experts (Comité du foin de Crau, 2005, personal communication). Such conditions result in very high ET_0 rates, and in order to limit the number of parameters, a relationship involving ET_0 is used to account for the role played by the conditions previously described. According to the climatic series, ET_0 values greater than a given threshold EXT_0 correspond both to high temperatures and to heavy windy rates. A second parameter, ξ , to account for the sensitivity of the correction is used.

The second factor is related to the HC specificity: a grassland system composed of different species. Each species presents various physiological growth cycle, strategy and persistence in Crau Hay composition along the season. But, in grassland, the strong diminution of the proportion of productive and fast-growing species, from first to last mowing, is a phenomenon usually observed. This seasonal effect impacts the yield of the last mowing which is systematically lower than which of the previous one's. Due to the difficulty to elaborate a modelling approach allowing the prediction of the complex natural evolution of species, an empirical model based on a threshold of cumulative temperature over which the radiation efficiency decreases, is adopted. Under average climatic conditions, this temperature threshold, T_{ds} , should approximately correspond to the beginning of the last production (generally few days after the second mowing). An empirical parameter ς is involved in a classical exponential expression usually devoted to predict the reduction of productivity of some species:

$$\text{Corm}(j) = \min [1., \exp(-\zeta(\text{ST}(j) - T_{ds}))] \quad (11)$$

, where $\text{ST}(j)$ is the cumulative temperature from $\text{DOY} = 1$ to the j date. Note that a same correction is applied to LAI.

When LAI_0 is greater than LAI_{\min} , Y_0 is derived from a LAI and yield relationship calibrated within a LAI range such as $0 < \text{LAI} < 3$:

$$Y_0 = 0.6 \max[0 ; (\text{LAI}_0 - \text{LAI}_{\min})]^{0.8} \quad (12)$$

Finally, the yield of a mowing is given by:

$$Y(j) = \text{Corm}(j) \cdot \text{RUE} \cdot \min(1., \text{EXT}_0/\text{ET}_0)^{\frac{1}{2}}, \text{Sr}(j) + Y_0 \quad (13)$$

,where :

$$\text{Sr}(j) = \text{Sr}(j-1) + \text{Rp}(j) \cdot \text{Srg}(j). \quad (14)$$

Calibration and evaluation

SIP calibration and evaluation

The utilisation conditions regarding the plot slope range of the region ($0.2 < S_0 < 0.25\%$) and the possible runoff at downstream validate the choice of the kinematic wave approach which the simplest St Venant solution governing the surface flow. This solution does not give very significant differences both on advance, and recession when compared to the zero inertia solution of SIRMOD III (Walker, 2003) as shown on Fig. 1, in spite of a lower mass conservation error for SIRMOD III (0.5% vs 1.5%). SIRMOD III is more especially used here to validate recession phase which was never monitored during our field experiments. Because extended Kostiakov equation ($Kt^a + f_0t$) is used in SIRMOD III, the latter was preliminary fitted ($K = 0.0348 \text{ m}^3$, $a = 0.249$, $f_0 = 0.000049 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) to infiltration data (with the model criterion efficiency of Nash –Sutcliffe: $\text{Nash} = 0.940$) obtained from Eq.(4). The parameter values $\lambda c = 60 \text{ cm}$, $Ks = 0.75 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ are derived from calibration on the advance trajectory of border A_1 for irrigation N° 9 in 2006 ($\text{DOY} 180$) (Table 1). The value of $\Delta\theta = 0.202$, deduced from neutron probe measurements and a χ value set to 25 (Mailhol, 2003). SIP and SIRMOD III simulate runoff (R_0) losses values of 6 and 5% respectively, water supply being cut-off when the advancing front reached $x = 380 \text{ m}$ approximately ($t_{co} = 440'$).

Due to the difficulty to measure the roughness coefficient, n is set to 0.3 in these simulations. This n value corresponds to the highest value of the variation domain proposed by Davis et al. (1985) for borders with alfalfa (0.15-0.3). Highest values, ranging from 0.2 to 0.36 were obtained using model simulations by Robertson et al., (2004) who did not find any relationship between n and pasture height due to the low flow rates (0.34 L/s/m) used during their field experiments. This value of $n = 0.3$ can be justified by the fact that LAI was very high ($\text{LAI} = 7.7$). According to farmer advices, front advance velocities are influenced by the grass height, advance time being very significantly reduced when irrigation occurs just after moving (about one or two hours less than before mowing for a 400 m-long border).

The advance monitoring of irrigation N° 8 of 2006 on A_1 occurring on $\text{DOY} = 170$ (Table 1) is used to validate the SIP parameters identified for irrigation N° 9. Using $\Delta\theta = 0.18$ obtained from neutron probe measurement before irrigation, $\lambda c = 60 \text{ cm}$ and $Ks = 0.075 \text{ cm/h}$ give a correct simulation of advance trajectory ($\text{Nash} = 0.997$ and a Root Mean Square Error : $\text{RMSE} = 8'$) with $n = 0.3$, the LAI value being of 6.9. But advance trajectory of irrigation N° 10, for the same plot, occurring on $\text{DOY} = 188$ (Table 1) is correctly simulated when n is set to 0.15 ($\text{Nash} = 0.995$, $\text{RMSE} = 9'$) instead of 0.3 ($\text{Nash} = 0.909$, $\text{RMSE} = 39'$). This change can still be justified by a low LAI value ($\text{LAI} = 0.87$) for this irrigation event, occurring few days after a moving. This n value is validated for irrigation N° 11 on $\text{DOY} = 187$ on A_2 (Table

1) which has a comparable LAI value ($LAI = 0.82$). A validation using roughness n values estimated from LAI simulation is proposed on Fig2a and Fig2b for 2004.

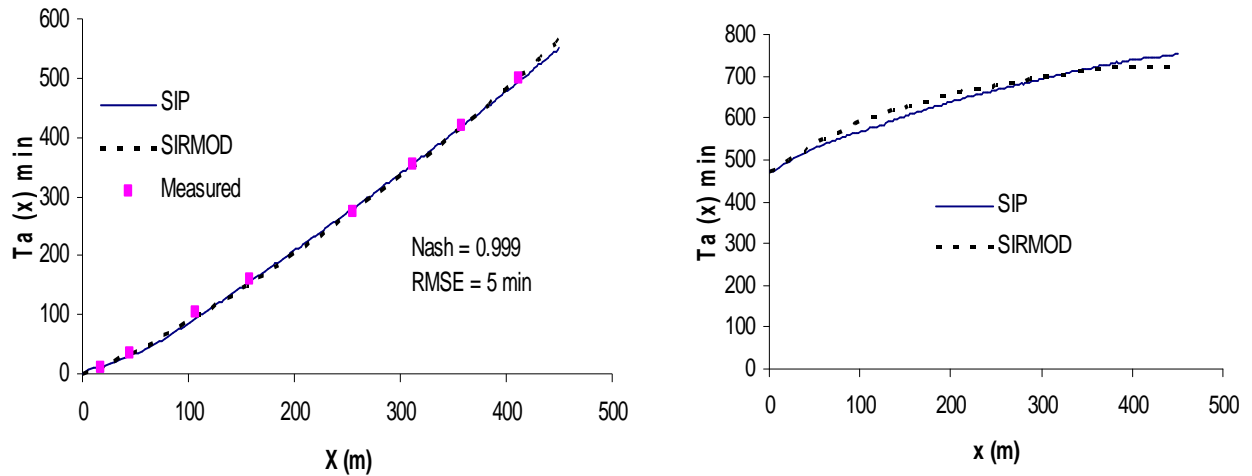


Fig.1 SIP Vs SIRMOD (with zero inertia solution), calibration on advance trajectory (a) on irrigation N° 7, DOY = 180 in 2006 on plot A₁, and recession (b). Water was cut-off when the advancing front reached $x = 380$ m, ($t_{co} = 440$ ') $\lambda_c = 60$ cm, $K_s = 0.75$ cm/h, $\Delta\theta = 0.202$, n being set to 0.3 ($LAI = 7.7$).

The whole of the monitored irrigation events on which SIP was tested are regrouped on Table 1. From this table, the following relationship can be proposed for predictive purposes:

$$n = 0.25 [1 - \exp(-LAI)] + 0.05 \quad (15)$$

, 0.05 being the n value generally adopted for a bare soil. The respective role played by factors such as n and $\Delta\theta$ in the advance process ($Ta(400)$ = measured or estimated time to reach $x = 400$ m) can also be identified. For instance, the role played by $\Delta\theta$ is highlighted when comparing the two last events which have a same n value. As previously explained, measured runoff losses are not sufficiently reliable to be compared with the simulated values. But, one can note that average simulated $Ro = 6\%$, when average measured $Ro = 13\%$.

Due to the infiltration characteristics and in spite of the fact that water supply is cut-off before the advancing front reaches the end of the plot, the minimum WAD is quite always greater than 100 mm. Thus, drainage occurs for each irrigation event whatever the considered location within the plot. Consequently, the risk of water stress will only result from irrigation timing (i.e. irrigation frequency).

Table 1. SIP simulation results under the different irrigation conditions ($Ta(400)$ = advance time (in min) to reach the abscissa $x = 400$ m)

Y -DOY	Plot	Q_{in} (L/s/m)	LAI	n	$\Delta\theta$	$Ta(400)'$	Nash	RMSE (min)
2004-153	A1	3.1	1.3	0.2	0.160	375	0.999	3.6

2004-222	A1	3.1	4.5	0.3	0.207	486	0.998	6.5
2004-242	B1	4.1	1.6	0.2	0.230	-	0.994	6.7
2004-214	A2	2.8	3.5	0.3	0.230	567	0.998	5.6
2005-180	A2	3.0	3.4	0.3	0.202	475	0.991	11.2
2005-215	A2	3.0	5.9	0.3	0.213	475	0.976	18.8
2006-170	A1	3.1	6.9	0.3	0.180	460	0.997	8.0
2006-180	A1	3.1	7.7	0.3	0.202	480	0.999	5.0
2006-177	A2	3.1	7.9	0.3	0.190	470	0.987	22.0
2006-187	A2	3.1	0.82	0.15	0.190	420	0.994	10.0
2006-188	A1	3.1	0.87	0.15	0.173	380	0.995	9.0

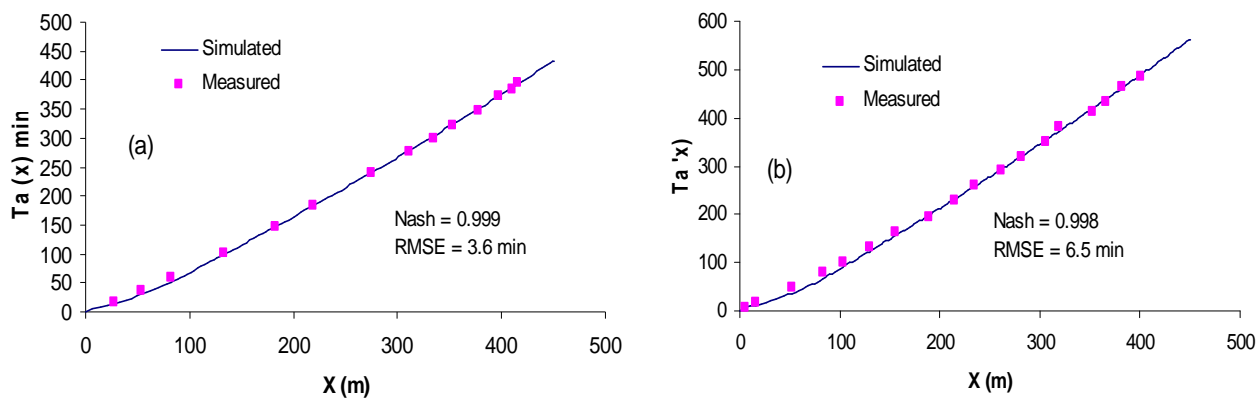


Fig 2. SIP validation on irrigation N° 7 on DOY=153 of 2004 on A₁ (a), $\Delta\theta = 0.16$ with $n = 0.2$ (LAI = 1.3) and on irrigation N° 14 on DOY= 222 of 2004 on A₁ (b), $\Delta\theta = 0.207$ with $n = 0.3$ (LAI = 4.5)

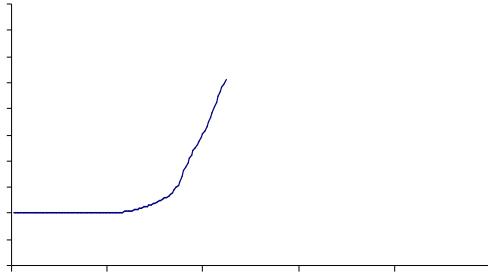
PILFC calibration

Model calibration was performed on the 2006 irrigation season which contains the most complete and reliable data. The calibration method consists on adjusting the LAI shape parameters on a full irrigated treatment when λ is calibrated on a treatment subject to a water stress. Subject to frequent irrigation events, the dry matter production (Dry Matter DM in T/ha) on the A₂ border is considered to be elaborated without any water stress, this state of fact being confirmed by tensiometer readings and herbage growth controlling (Merot et al.,2007). The LAI data in 2006 corresponding to the second DM production are used to fit the shape parameters. The values of α , are $\alpha_1 = 3.7$, $\alpha_2 = 4.4$ and $\beta = 3.0$ when a LAI_{min} = 0.75 is considered. The calibration of the shape parameters (the efficiency coefficient of Nash = 0.987) is based on a t_m value of 900°C derived from the required cumulative temperature to reach the beginning of the LAI plateau on A₁. The RUE parameter is derived from the yield of first mowing (not affected by the peculiar climatic conditions previously described) when T_{mat} is derived from the production plateau of the third mowing. Observations of the end of flowering allows the experimentally estimation of T_{mat}. The respective values of these two parameters are 0.37 gMJ⁻¹ and 1020 C°.

At this calibration stage, the effect of high windy conditions (inducing high ET₀ rates) on the DM production is tested. Initially, the threshold value EXT₀ was selected from a climatic data analysis. It was established that ET₀ values greater than EXT₀ = 8, generally resulted from high windy rate conditions. Note that such high ET₀ values are rarely observed before the beginning of the second mowing.

Using model simulations, a value of 5 for ξ , was adopted in order to match the average yield losses proposed by the experts. Because generally harvested in spring, first production is not affected at the opposite of the two subsequent. The HC production rate of 2004, at the opposite with that of 2005 and 2006, is not significantly affected by the correction devoted to RUE as verified using model simulations.

The cumulative temperature from DOY = 1 until a date corresponding approximately to that of the second harvesting is $T_d = 2800^\circ\text{C}$, a value of 0.0005 for ζ results in a satisfactory simulation of the dry matter production for the third mowing ($2.6 \text{ T}\cdot\text{ha}^{-1}$). LAI of the third mowing (Fig. 3a) is not as well simulated as the DM production rate (Fig. 3b) of plot A₂.



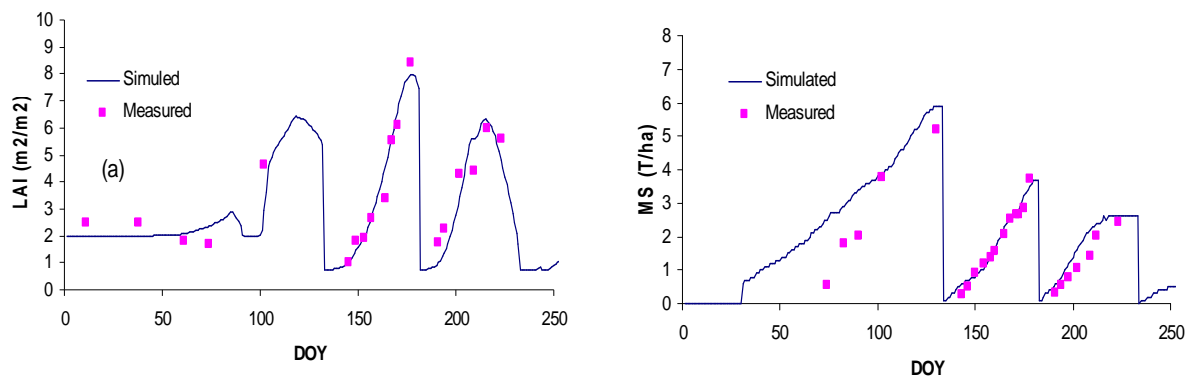


Fig. 4 LAI (a) and the MS production (b) for A₁ plot in 2006

PILFC Evaluation

DM accumulation and LAI

Model evaluation for DM accumulation and LAI 2005 is presented on Fig. 5 and Fig. 6. Because of the experimental protocol, model validation for 2004 is focussed on DM manually harvested on the yield sub-plots for the last mowing (Fig. 7). A slight overestimation of DM was observed for each beginning of the production season whatever the year. However, despite of few gaps (more especially for the 3th mowing of A₂ in 2005), LAI and the herbage growth can be considered as correctly simulated. At last, DM production manually harvested is well enough simulated for the 3 years (Fig. 8).

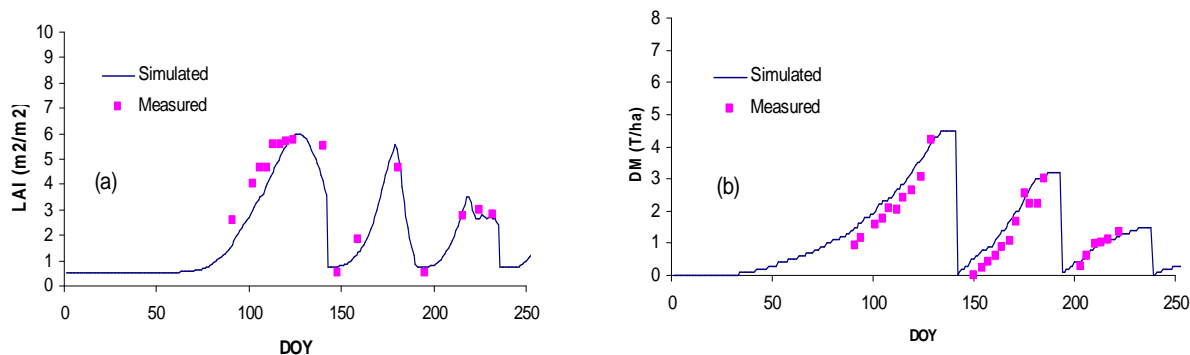


Fig. 5 LAI (a) and DM production (b) for A₁ plot in 2005

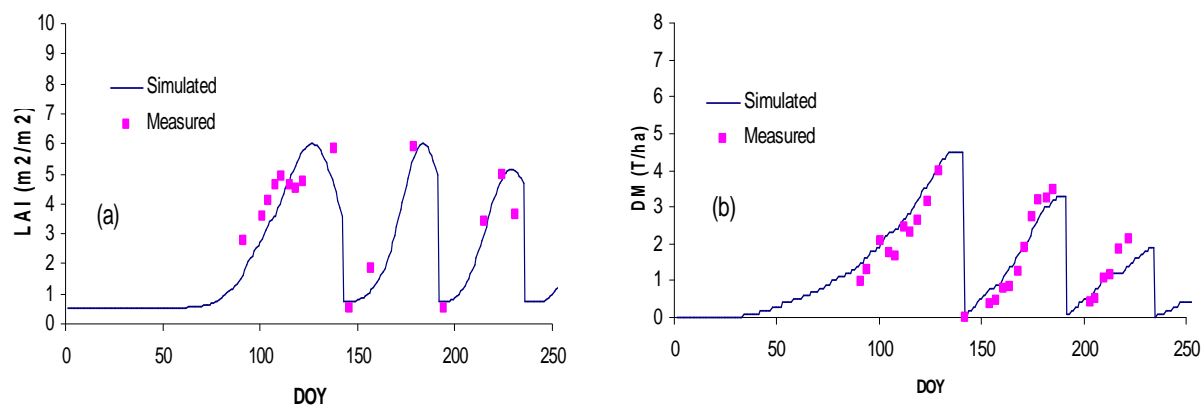


Fig. 6 LAI (a) and DM production (b) for A₂ plot in 2005

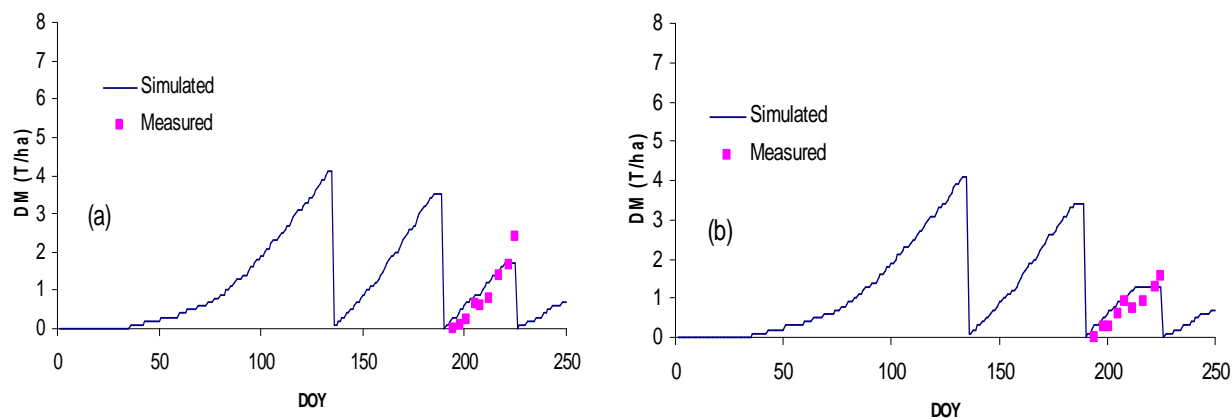


Fig.7 DM production for A₁ (a) and A₂ (b) plots in 2004

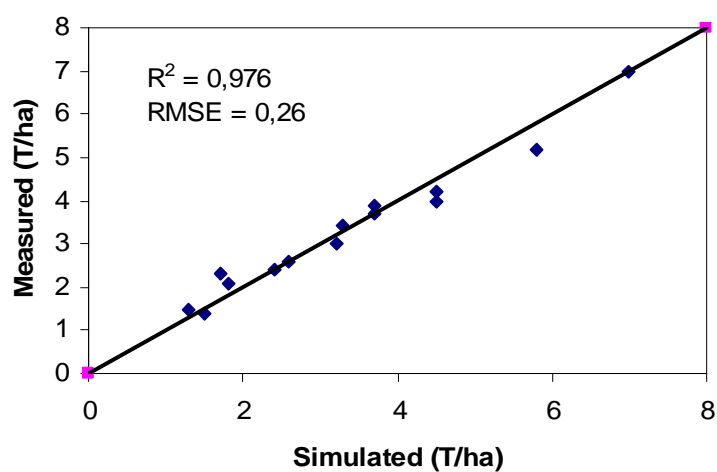


Fig. 8 DM production (manual harvesting) along the 2004-2006 seasons

Soil Water Reserve

As attested by Fig.9, SWR is correctly simulated in 2006 with RMSE close to 10 mm. In 2005, the quality of the simulation is a little better for A₁ (Nash = 0.86 ; RMSE = 6.4 mm) and A₂ (Nash = 0.87 ; RMSE = 6.4 mm). In 2004, RMSE values were not so good for the two plots A₁ and A₂ ($0.72 > \text{Nash} > 0.60$ and $22 > \text{RMSE} > 20$ mm). Attested gaps highlight an overestimation of SWR for intense deficit (SWRD > 70%), when that of 2005 and 2006 can be considered as moderate (SWRD < 65%). But, due to high sensitivity of grassland to moderate water deficit (Merot et al., 2007), and in a perspective of model utilisation for HC management, a moderate SWRD merits to be taken into consideration only.

Consequently, one can reasonably attest that SWR and DM production are both well enough simulated by PILFC.

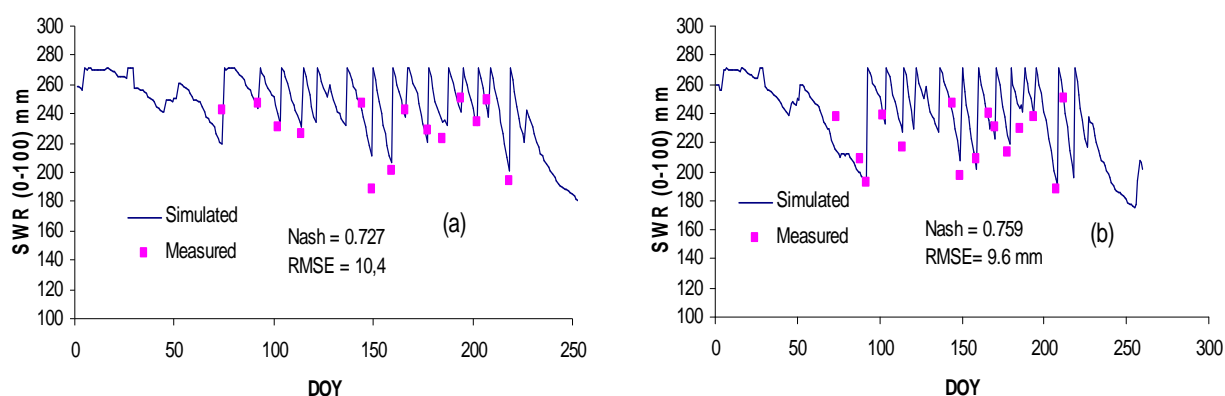


Fig. 9 Soil water reserve (SWR) from 0 to 100 cm depth for A₂ (a) and A₁ (b) plots in 2006 (Nash criterion and RMSE= root mean square error)

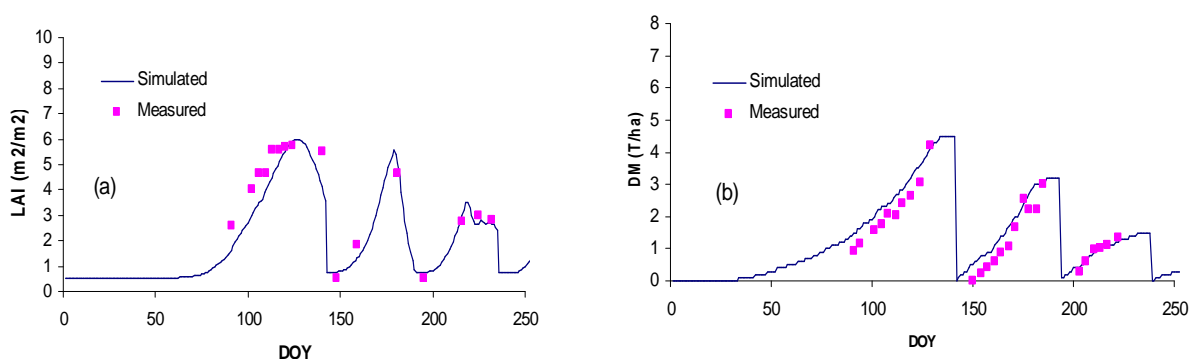


Fig. 6 LAI (a) and DM production (b) for A₁ plot in 2005

SPFC: The SIP-PILFC coupling

Assuming a homogeneous soil border (soil, plant and deficit before irrigation), WAD heterogeneity only results from opportunity time variability. The border is divided into subplots having 10 m long, a length step on which WAD can be considered homogeneous. PILFC runs on each subplot of $1 \times 10 = 10 \text{ m}^2$ with a WAD simulated by SIP. The latter in turn, makes use of $\Delta\theta$ (for Eq.(4)) and LAI (for Eq.(15)) values predicted by PILFC to simulate the irrigation event. As WAD at the level of each subplot overreaches field capacity, PILFC does not simulate any HC production differences from upstream to downstream. Consequently, yield variability cannot be used as a criterion to validate this model coupling.

SPFC application:

Using model simulations, it is possible to test some irrigation strategies combined with realistic plots sizes in view of water saving still compatible with a required yield level and a production quality. Plot size reduction can be obtained by changing the direction of flow, the inflow rate being held at $Q_{in} = 3 \text{ L/s/m}$. Of course, this operation requires a plot leveling in a perpendicular direction to the previous flow, the initial plot of 450 m long being divided into two plots of 200m long, 2x25 m being devoted for the water supply and the runoff ditches. In agreement with the irrigation practices, the irrigation season starts on DOY=70 and stops on DOY=240. The results of the simulation, based on the climatic scenario of 2005, are summarized in Table 2. One can see that a significant amount of water can be saved when dividing the plot length approximately by two and scheduling irrigation for a soil water reserve depleted (SWRD) at 50%. For a field length FL = 450 m water supply is cut-off when the advancing front reaches $x = 0.85FL$ and at $x = 0.77FL$ for FL = 200 m. The scheduling option SWRD = 50% which reduces the irrigation frequency, sensitively affects the maximum yield value (8.6 Vs 9.5 T/ha). It requires less water but above all less manpower: 8 irrigation events cumulating a total water application (TWA) of 10820 m³/ha against 11 giving a TWA of 14600 m³/ha.

The application efficiency (AE) of the solution resulting in the best water saving has widely the highest AE value (AE = 56%) with an acceptable irrigation uniformity (UC = 80%) and weak runoff losses (Ro = 2%), the groundwater recharge being still guaranteed with an averaged drainage value D = 500 mm. These simulation results highlight the role that could play an efficient scheduling method in the water saving whatever the size of the border. Indeed, on the basis of the potential yield (9.5 T/ha) an amount of water near of 5000 m³/ha can be saved.

The pertinence of the identified “optimal solution” at the plot scale will probably have to be reconsidered after the introduction of SPFC in a DSS that will integrate all the constraints existing at farm level.

Table 2. Example of simulation results combining irrigation scheduling strategies (for an Irrigation period from DOY = 70 to DOY = 250) with plot sizes for the climatic scenario of 2005 (the water supply is cut-off when the advancing front reaches 85% of FL = 450 m and 77% of FL = 200m). %SWRD = depletion level of the soil water reserve, AE = application efficiency, TWA= Total Water application, NIV number of irrigation events during the season, D = drainage losses, Y = yield, UC = uniformity coefficient, Ro% = runoff losses (AE, D, UC, Ro are averaged values calculated from 8 or 11 irrigation events)

L(m)	%SWRD	AE%	TWA(m ³ /ha)	NIV	D(mm)	Y(T/ha)	UC(%)	Ro(%)
450	40	35	19170	11	1150	9.5	87	8
450	50	42	14300	8	800	8.6	86	6
200	40	47	14600	11	800	9.5	85	4
200	50	56	10820	8	500	8.6	80	2

Conclusion

SPFC: a modelling approach to manage water and HC production at plot level was elaborated. It results from the coupling of a predictive border irrigation model with a crop model, both successfully validated. The crop model estimates water balance and HC production on the k subplots along the border. It provides the initial soil water content allowing the infiltration

equation of the border model to be updated before each irrigation event and the LAI value required for the estimation of n , the roughness coe

- Lacape M.J., J. Wery, et al. (1998). "Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars." *Field Crops Rech.* 57: 29-43.
- Mailhol J.C. and Gonzalez, J.M., (1993). A furrow irrigation model for real time applications on cracking soils – *J. Irrig. Drain. Engin., ASCE*, Vol 119 N°5 Sept/Oct 1993, 768-783p.
- Mailhol J.C., O. Olufayo, P. Ruelle, (1997). AET and yields assessments based on the LAI simulation. Application to sorghum and sunflower crops. *Agric. Water Manag.* 35(1997) 167-182p.
- Mailhol J.C., Priol M., Benali M. (1999). A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. *Agric. Water Manag.* 1475 (1999) 1-17
- Mailhol J.C., (2003). A predictive form of Horton's equation for simulating furrow irrigation. *J. Irrig. and Drain. ASCE*, Vol 129 (6): 412-421.
- Mailhol J.C., Zaïri A., Slatni A., Ben Nouma, B., El Amami, H., (2004). Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia'' *Agric. Water Manag.* (70), 19-37.
- Mailhol J.C., Ruelle P., and Z. Popova, (2005). SOFIP: A field-scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. *Irrig. Sci.* (24): 37-48.
- Merot A. Wery J., Isbérie C., and F. Charron, (2007). Response of multi-species grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *European Journal of Agronomy*, In press.
- Petit V., (1981). Etude et modélisation de la variabilité de l'évapotranspiration réelle – Application au bilan hydrologique de la plaine de Crau. *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Université Pierre et Marie Curie – Paris VI*, p114.
- Rayej, M., and Wallender, W.W, (1985). Furrow irrigation time reduction. *J of Irrig. Drain., ASCE* , Vol 111, NO 2
- Walker, W.R., and Humpherys, A.S., (1983). Kinematic wave furrow irrigation model. *J. Irrig. Drain. Engin. ASCE*, Vol 116 NO 3, 299-318.
- Walker W.R , (1993). SIRMOD, a surface irrigation model. Utah State University Depart of .Biol. and irrig. Engin., UTAH State University Logan UT 84322-4105.
- Walker W.R , (2003). SIRMOD III, a surface irrigation software. Course guide and technical documentation. Depart of Biological and irrig. Engin., UTAH State University Logan UT 84322-4105.
- Weiss M., (2002). [www Avignon.inra.fr/can_eye/](http://www.Avignon.inra.fr/can_eye/)
- Welles, J.M. and Norman J.M, (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.* 83(5): 818-825.

IV.4. Modélisation de la dynamique de croissance et du bilan hydrique

IV.4.1. Objectifs et démarche

Dans ce paragraphe, nous proposons un modèle représentant la dynamique de la biomasse, de l'indice foliaire, du stock d'eau du sol et du drainage. Ce travail est réalisé à partir du modèle spécifique de prairie développé par Adam et al. (2007). Ce modèle est basé sur l'approche fonctionnelle des traits spécifiques (Lavorel et al., 1997) permettant de prendre en compte la plurispécificité du système prairial. Précédemment testé sur des prairies plurispécifiques à majorité de graminées, le modèle a été modifié afin de prendre en compte les spécificités des prairies de Crau : la forte sensibilité de la prairie au déficit hydrique modéré, l'effet du vent sur la transpiration et la croissance, la diversité floristique et l'importance des dicotylédones. L'approche fonctionnelle est plus pertinente que l'approche plus empirique de PILFC (voir ci-dessus) notamment pour différencier la part de certaines espèces dans la croissance. Contrairement au modèle PILFC, la biomasse est aussi simulée comme une variable d'état dans le modèle ce qui permet de différencier les effets du vent, de la température, du stress hydrique sur l'indice foliaire et sur la biomasse.

IV.4.2. Méthodologie

IV.4.2.1. Les adaptations réalisées au modèle prairie

Le modèle d'origine est composé de deux modules : un module de calcul de la biomasse et un module de calcul du LAI (Annexe 5). Nous avons apporté trois adaptations majeures :

- (i) Un module sol est ajouté. Le sol est représenté sous la forme d'un réservoir monocouche sur lequel est appliqué un bilan hydrique. Ce module permet de simuler l'évolution dynamique du stock d'eau du sol (ASW), l'évapotranspiration réelle (Eta), la fraction d'eau du sol transpirable par la plante (FTSW), le drainage (D) et l'indice de stress hydrique (fwi). Celui-ci est ensuite appliqué à la croissance de la plante.
- (ii) L'effet de forts vents sur la transpiration est pris en compte (Takagi et al., 1998 ; Sato et al., 2006). Nous avons intégré un seuil de vent à partir duquel, lorsque la plante est en stress hydrique (Sato et al., 2006), l'ETa est considérée nulle. Cet effet se répercute ensuite sur la

croissance du LAI et l'efficacité de conversion du rayonnement (Olios et al., 1995 ; Daudet et al., 1999).

(iii) La composition floristique évolue de la première à la troisième coupe, notamment les dicotylédones devenant majoritaires en troisième coupe. Pour le prendre en compte, nous avons considéré deux groupes d'espèces : les graminées affectées par la sénescence et les autres espèces qui ne sont pas affectées par la sénescence. En deuxième et troisième coupe, les traits fonctionnels sont identiques et nous avons opté pour une pondération de ceux-ci en fonction de la proportion des graminées. Le calcul de l'efficacité de conversion du rayonnement et de la croissance de l'indice foliaire intègre les spécificités floristiques des prairies de notre cas d'étude. En première coupe, le taux d'accroissement maximum de l'indice foliaire et le taux de conversion du rayonnement en biomasse (deux traits fonctionnels) sont augmentés pour simuler la forte proportion des graminées.

IV.4.2.2. Méthode d'estimation des paramètres

Le nombre de paramètres du modèle à optimiser par approche statistique a été limité à six en catégorisant les paramètres en trois groupes : (i) les paramètres estimés à partir de mesures, (ii) les paramètres estimés à partir de la bibliographie et (iii) les paramètres estimés par méthode statistique.

L'estimation de ces six paramètres est basée sur la minimisation d'un critère d'optimisation à partir de l'ensemble des données collectées (Wallach et al., 2001 ; Wallach et al., 2006). Ce critère d'optimisation tient compte des trois principales variables d'état mesurées du modèle (Figure I.1) : le stock d'eau du sol, l'indice foliaire et la biomasse. Il est construit comme la somme des carrés des écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées pondérée pour chaque mesure par l'erreur de mesure observée.

L'évaluation du modèle est réalisée à partir du calcul de l'erreur moyenne au carré (MSE) par type de mesure (Wallach et al., 2001) décomposée en trois termes de manière à identifier les sources d'erreur (Kobayashi et Salam, 2000, cited by Wallach et al., 2006). L'approche est complétée par une analyse de sensibilité (Wallach et al., 2006) pour l'ensemble des six paramètres. La valeur prédictive du modèle MSEP par type de variable est enfin estimée par validation croisée et confrontée au MSE (Wallach et al., 2006).

IV.4.3. Résultats

La valeur des six paramètres a été optimisée. L'analyse de sensibilité n'a pas fait apparaître de minima locaux qui pourraient remettre en cause la qualité de l'optimisation.

L'analyse des MSE ne montre pas de valeur de biais élevée, la majeure partie des améliorations dans le modèle a été faite (Wallach et al., 2006).

Les résidus (valeurs observées moins valeurs simulées) ne laissent pas apparaître de déviation notoire dans les simulations. Le modèle est donc bien construit (Wallach et al., 2006).

Les sorties du modèle sont principalement influencées par deux paramètres de traits fonctionnels : l'efficacité potentielle de conversion du rayonnement RUE_rate et de la croissance potentielle journalière de l'indice foliaire LAI_rate. Par rapport au modèle d'origine, les erreurs de simulations pour notre modèle adapté sont moins sensibles aux paramètres RUE_rate et la durée de vie d'une feuille LLSmin (Adam et al., 2007).

Les évolutions de la biomasse et de l'indice foliaire sont correctement simulées, les ralentissements de la croissance dus à des stress hydriques sont simulés. L'erreur de simulation sur les rendements est faible en première coupe. Le modèle sous-estime les rendements à chaque simulation en deuxième coupe et souvent en troisième coupe. Les valeurs de LAI sont correctement simulées jusqu'à des LAI de 4.5, au-delà, les erreurs d'estimation de LAI sont grandes. Etant donnée la forme de la relation LAI – rugosité, ces erreurs de LAI ont peu de conséquences sur l'évaluation de la rugosité pour le modèle d'avancement. Le FTSW est correctement simulé dans la majeure partie des situations.

Bien que nous n'ayons pas pris en compte les phénomènes hivernaux complexes ou la nutrition azotée, l'estimation de MSE, par MSE puis MSE obtenue par validation croisée, montre que l'erreur moyenne de prédiction pour chaque variable est faible (de l'ordre de 0.12-0.17 T.ha⁻¹ pour la biomasse, 0.3 T.ha⁻¹ pour les rendements, 0.09 pour le LAI et 0.012-0.019 pour le FTSW). Cette erreur est acceptable par rapport aux objectifs fixés. La qualité des simulations au regard des équations confirment l'hypothèse selon laquelle on peut simuler la croissance de la plante sans module azote, l'eau est donc le principal facteur limitant du système (Burke et al., 1997).

IV.4.4. Article: Adaptation of a functional model of grassland to simulate the functioning of irrigated grasslands under a Mediterranean climate: The Crau case

Adaptation of a functional model of grassland to simulate the functioning of irrigated grasslands under a Mediterranean climate: The Crau case

Merot A.^{1,2*}, Bergez J.E.³, Wallach D.³, Duru M.³

¹ UMR System (CIRAD-Inra-SupAgro), bâtiment 27, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

² Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale, Le Tholonet –CS 70064, 13182 Aix en Provence Cedex 5, France.

³ UMR AGIR, INRA, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France.

* corresponding author: Fax: +33 (0)561285037; Email : Jacques-Eric.Bergez@toulouse.inra.fr

Keywords: irrigated multi-species grassland, Mediterranean areas, wind effect, crop model, parameter estimation, cross-validation, predictive quality

INTRODUCTION

In order to ameliorate irrigation practices in areas with high environmental issues, one can use computer simulation models to evaluate and conceive cropping systems based on agronomical, ecological and socio-economic criteria (McCown et al., 1996; Meynard et al., 2006). Such models have to associate a decision model and a biophysical model simulating the crop reaction to new irrigation scheduling (Bergez et al., 2006). A good predictive crop model is then required.

Numerical crop models were developed to cope with the estimation of agronomic and environmental criteria from the soil-plant system (Brisson and Wery, 2002) but were mainly elaborated for cereals especially when dealing with irrigation (Ritchies and Otter, 1985; Santos et al., 2000; Rinaldi et al., 2001). Concerning grasslands, models are often developed under the agronomic point of view of the grazing system with strong links with the defoliation practices (Cros et al., 2003, Herrero et al., 1997, Schapendonk et al., 1998) or under an ecological point of view with a detailed description of competition for nutrients and light (Pervanchon, 2005; Corson et al., 2006). Most of these models are based on functional equations but they are limited on the simulation of one or two mixed grassland species under a temperate climate and not necessarily with irrigation.

The majority of crop models aims at reproducing the soil and plant dynamic functioning from biological and physical laws under the influence of climate and technical practices (Brisson and Wery, 2002; Wallach et al., 2006). The user has to fix the value of some parameters, i.e. “they take a fixed value for all site-years or groups of site-years” (Wallach et al., 2001). Parameter estimation and model evaluation are essential phases in every modelling project (Wallach et al., 2006). Due to the large number of parameters in most of the crop models and to the small amount of data available, the use of automatic methods to estimate the model's parameters is difficult (Tremblay and Wallach, 2004). However in order to be confident in the model, a reproducible procedure for the estimation of prediction error of the model is needed (Wallach, 2001). There has been little work on parameter estimation for crop models. Most of the studies are based on trial – error approach where different values of the parameters are tested until the simulation fit reasonably well the data. Accordingly to Wallach et al. (2001), three questions have to be raised in order to properly estimate crop models parameters: i) Which parameters are to be adjusted to experimental data? ii) Which criterion chosen to optimize to fit calculated data to field data? iii) Which numerical algorithm for searching the parameters that minimize the chosen criterion?

The aim of this paper is to present a rigorous method to estimate and evaluate a crop model. This method is applied on a grassland growth model. This grassland model derives from a published grassland model but modified to fit some biophysical specificity of the cropping systems. A first section presents the new processes added in the published model. A second section present the parameterisation and evaluation procedure. A third section gives the main results of the model parameterisation. A last section discusses the method and the novelties added in the grassland model.

MATERIAL AND METHODS

Context of application

The grassland model we are interested in should allow simulating grassland functioning in the Crau plain in Southern France (43°38 N, 5°00 E). This is a region with multifunctional agriculture where conventional water management guidelines have to be modified (Balland et al., 2002) in order to ensure both higher water productivity and positive environmental externalities and sustainability of farms. Farmers in this area use border systems to irrigate grasslands on stony soils with a low water retention capacity. Water application amount is between 15 000 to 20 000 m³.ha⁻¹.year⁻¹, and losses through drainage is from 60 to 70% of the applied water. The irrigated multi-species permanent grasslands are the basis of local agriculture and produce high-value hay with a Certified Origin Product (COP) label.

Irrigation lasts for 7 months. There is no mineral nitrogen supply. Four successive growing periods are reported: 3 successive phases ended by a mowing for quality hay production. The last growing period is used for grazing during the cold season. Grasslands are always mowed when grasses reach ear emergence stage. The main species are Legumes (*Medicago lupulina* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Lotus corniculatus* L., *Vicia cracca* L.); Grasses (*Dactylis glomerata* L., *Lolium perenne* L., *Poa pratensis* L.; *Holcus lanatus* L.; *Arrhenatherum elatius* L.; *Festuca pratensis* L.; *Setaria glaucus* L., *Paspalum dilatatum* Poir) and diverse dicotyledons (*Plantago lanceolata* L., *Taraxacum officinale* Weber., *Tragopogon pratensis* L., *Galium mollugo* L., *Galium verum* L., *Daucus carota* L., *Achillea millefolium* L., *Pastanica silvestris* L., *Rumex acetosa* L.). The botanical composition varies during the hay production season. The proportion of grasses decreases from the first growing to the third growing period while the proportions of legumes and others species increases.

The grassland model

The original model, developed by Adam et al. (2007), is based on a functional approach allowing adapting mono-species model to multi-species grasslands through the concept of functional types (Diaz and Cabido, 1997). The model is presented in full extent in Adam et al. (submitted). The variables, input data and parameters are gathered in Appendix 1. Each day d , the cumulative variables Leaf Area Index (LAI) and the Dry Matter (DM) are simulated as the difference between growth and senescence (eq. 1):

$$\text{Variable}(d) = \text{Variable}(d-1) + \text{growth}(d) - \text{senescence}(d) \quad \text{Equation 1}$$

$$\text{And } \text{Growth}(d) = \text{growth_potential} * f_e * f_p * f_s$$

$$\text{Senescence}(d) = f(\text{Leaf_life_Span}, \text{cumulative_temperature}, \text{Variable}(d-1))$$

With f_e = factor of correction of growth potential associated with environmental factors (season, temperature); f_p = factor of correction of growth potential associated with practices (water deficit, nitrogen status, mowing); f_s = factor of correction of growth potential associated with phenological stages (vegetative and reproduction stage)

The DM growth potential is equal to the Radiation Use Efficiency rate (RUE_rate) * PAR and the LAI growth potential is equal to LAI rate. LAI_rate and RUE_rate are functional traits.

Three new processes have been implemented in order to simulate the specificities of irrigated grassland under a Mediterranean climate: i) addition of a water balance module, ii) adaptation to the windy climate and iii) introduction of the botanical composition effect.

The *water balance model* is based on works carried out by Merot et al. (2007). These authors showed that the Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW) is a pertinent indicator of water stress experienced by the crop and that FTSW can be simulated using a one-dimension soil water reservoir.

The added soil water module evaluates the available soil water (ASW), FTSW, the actual evapotranspiration (ET_a), the drainage (D) and a water stress coefficient (fwi). It is composed of one reservoir of soil on which is applied a water balance (eq. 2). It requires daily climatic data as rainfall (P), evapotranspiration (ET_0), wind velocity (V) and technical data as irrigation supply (I). The evolution of ASW on day (d) writes (eq. 2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } ASW(d-1) + P(d) + I(d) - ET_a(d) > TTSW \text{ THEN } ASW(d) = TTSW \\ \text{ELSE } ASW(d) = ASW(d-1) + P(d) + I(d) - ET_a(d) \end{array} \right\} \text{Equation 2}$$

With TTSW = Total Transpirable Soil Water (Merot et al., 2007)

$$FTSW(d) \text{ is calculated as the ratio: } FTSW(d) = \frac{ASW(d)}{TTSW} \text{ Equation 3}$$

$ET_a(d)$ is then calculated according to eq. 4:

$$Y \left\{ \begin{array}{l} \text{IF } ((V(d) > vent_p1 - 2) \text{ AND } (FTSW(d) < FTSW_{-1})) \text{ THEN } ET_a(d) = 0 \\ \text{ELSE} \\ \text{IF } FTSW > FTSW_{-1} \text{ THEN } ET_a(d) = ET_0(d) \\ \text{ELSE } ET_a(d) = FTSW(d) * \left(\frac{ET_0(d)}{FTSW_{-1}} \right) \end{array} \right. \text{Equation 4}$$

Where $FTSW_{-1}$ (Fig.1) is the FTSW from which impacts of water deficit are observed on the crop; we considered that the wind velocity limits ET_a for wind velocities higher than ($vent_p1 - 2$) (see below).

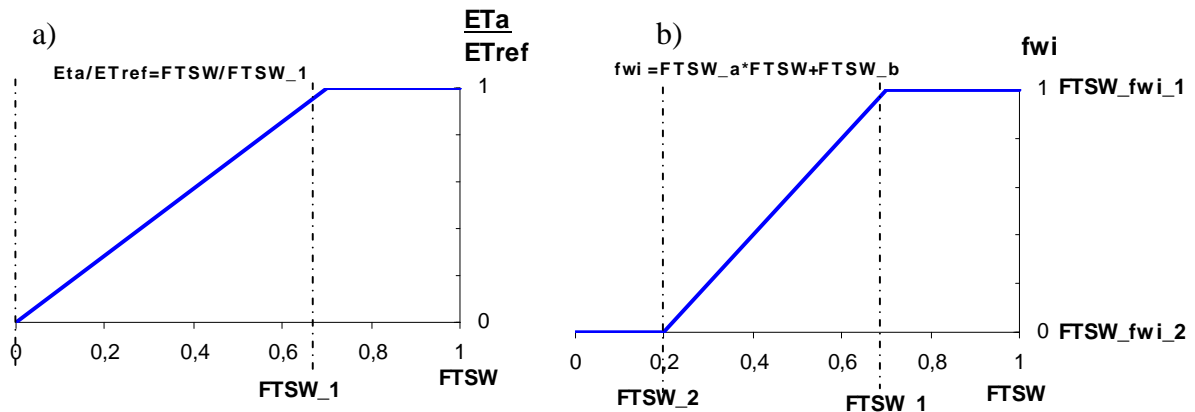


Figure 1: relations between ET_a and FTSW (a) and coefficient of water stress fwi and FTSW (b)

The link between plant component and soil component is assured through the water stress indices fwi (Merot et al, 2007, Fig.1)

fwi is calculated as follow eq. 5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } FTSW > FTSW_{-1} \text{ THEN } fwi = 1 \\ \text{ELSE} \\ \quad \text{IF } FTSW < FTSW_{-2} \text{ THEN } fwi = 0 \\ \quad \text{ELSE } fwi = (FTSW_{-a} * FTSW + FTSW_{-b}) \end{array} \right\} \text{Equation 5}$$

With $FTSW_{-2}$ (Fig.1) is the FTSW corresponding of the maximum impact of water deficit on the crop; $FTSW_{-a}$ and $FTSW_{-b}$ are defined on Fig.1.

Finally Drainage is evaluated from the eq. 6:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } ASW(d-1) + P(d) + I(d) - ETa(d) > TTSW \\ \quad \text{THEN } D(d) = D(d-1) + (ASW(d-1) + P(d) + I(d) - ETa(d) - TTSW) \\ \text{ELSE } D(d) = D(d-1) \end{array} \right\}$$

Equation 6

The Crau Mediterranean region, like most of the semi-arid regions, is characterized by a high level of vapour pressure deficit due to *windy conditions* (Rana and Katerji, 1998). Some studies showed that when daily vapour deficit is large, leaf conductance is kept low to prevent excessive water loss (Takagi et al., 1997; Kallarackal and Somen, 1997; Sato et al., 2006; Oguntunde et al., 2007). Sato et al. (2006) observed a linear relationship between the stomatal conductance and the ratio of ASW on vapour pressure deficit; this lead to two important consequences: i) even when FTSW is nearly equal to 1, stomatal conductance can be small; ii) the effect of vapour pressure deficit on stomatal conductance is function of FTSW. In fact, when leaf water potential reaches a critical value that strongly depends on vapour pressure deficit, feedback mechanisms based on hormonal regulations tend to regulate stomata conductance (Olioso et al., 1995). Direct effects on photosynthetic rates were also reported (Olioso et al., 1995). Thus as strong wind contributes to the increase of vapour pressure deficit, the transpiration and photosynthetic rates become a function of wind speed from a critical value of stomatal conductance under the influence of soil water deficit (Martyn and Caldwell, 1970; Daudet et al., 1999). This effect was taken into account in our model by first decreasing ET_a depending on the wind velocity (V) (see above eq. 4) then by decreasing Leaf Area Index and Radiation Use Efficiency (eq. 7), considering ET_a was impacted before LAI or RUE.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{IF } ((V(d) > Vent_{-p1}) \text{ AND } (FTSW < FTSW_{-moy})) \text{ THEN } ((RUE = 0) \text{ AND } (GLAI = 0)) \\ \text{ELSE } ((\text{Calculation of RUE}) \text{ AND } (\text{Calculation of GLAI})) \end{array} \right\}$$

Equation 7

With RUE= Radiation Use Efficiency; GLAI = daily LAI growth; $Vent_{-p1}$ = wind velocity from which GLAI and RUE are impacted; $FTSW_{-moy} = (FTSW_{-1} + FTSW_{-2})/2$. The calculations of GLAI and RUE are detailed below.

The last modification concerns the *multi-species aspect*. A way to adapt mono-species grassland model to multi-species grasslands is through the concept of the functional types (Lavorel et al., 1997, Duru et al., 2004; Adam et al, 2007). Adam et al. (2007) considered that grasses and dicotyledons are similar in terms of behaviour (considering leaf dry matter content, phenology and leaf stem ratio). In our study case, important variations of botanical composition were reported from the 1st to the 3rd mowing. For the 3rd mowing, grasses are in minor proportion in grasslands. We had to make the difference between species and between growth phases. Species were sorted into 2 groups: grasses G and others species L (mostly including legumes so as *Trifolium pratense* L.). Phenological stages, leaf lifespan stayed unchanged for the two sets of species as assumed in the functional traits concept.

Table 1: data set for all measurements

Measure	Year	Number of data Border T in eld A	Number of data Border P in field A
DM	2006	26	25
	2005	27	27
	2004	7	8
LAI	2006	17	18
	2005	7	14
	2004	0	0
FTSW	2006	15	14
	2005	70	72
	2004	15	12

The observation of phenological stages in the borders was used to evaluate the thermal time requested to reach the beginning of the reproduction stage, the flowering time and the maturity (Table 2 and Table 3).

Table 2 : cumulative temperature corresponding to phenological stages in 2005 and 2006, for border A and B and mowing 1 to 3.

Year	Mowing	Field	Timing of latency period (thermal time °C)	Timing of tillering (thermal time °C)	Thermal time between the beginning of reproduction stage (tillers emergence) and flowering °C	Thermal time between flowering and maturity °C
2005	1	T		234	465	148.5
		P				
	2	T	192.7	240.5	461.4	136.2
		P	205.8	242.1	450.9	142.6
	3	T	192.8	244.2	464.7	129.6
		P	193.6	243.2	452.6	134.4
	Mean		196.2	240.8	458.9	138.3
2006	1	T		236.5	460.5	140
		P		233.5	459.8	132.7
	2	T	197.3	246.9	470.4	132
		P	209.6	237.3	468.2	150.5
	3	T	198.1	235	466.7	142
		P	207.7	241.9	460.5	147.9
	Mean		203.2	241.9	464.3	140.8
Duration of the growing cycle (thermal time)			1040.5			
Thermal time between the beginning of growing and beginning of ear emergence (épis sorti observed in the field)			439.3			
Thermal time between the beginning of growing and flowering			900.9			

* épis observés à la sortie de la gaine

Table 3 : Parameters obtained by field measurements

Measured parameters	Unity	Description	Estimation method	Value
Tc	°C	Thermal time to beginning of reproductive stage	Field observations (Table 2) 2005 - 2006	340
Tflo	°C	Thermal time to flowering		900
Tmat	°C	Thermal time to maturity		1000
Residual biomass	T.ha ⁻¹	Aboveground biomass to collect after mowing	Sampling (see above)	0.001
Residual LAI	m ² .m ⁻²	Residual Leaf Area Index after mowing	Evaluation by hemispherical photos (see above)	0.5
TTSW	mm	Total transpiration Soil Water	Neutron probe measurement (Merot et al., 2007)	90.58
FTSW_1	mm.mm ⁻¹	FTSW corresponding to the beginning of the impacts of water deficit on the crop	Neutron probe measurements (Merot et al., 2007)	0.7
FTSW_2	mm.mm ⁻¹	FTSW corresponding to the maximum impact on crop of water deficit	Neutron probe measurements (Merot et al., 2007)	0.2

Leaf Area Index (LAI) was evaluated every twice a week using hemispherical photographs until herbage reached the averaged height of 0.15 m (Breda, 2003; Jonckhere et al., 2004; Mailhol and Merot, 2007) and a plant canopy analyser (Model LAI 2000 – LI-COR) afterward (Welles, 1991; Mailhol and Merot, 2007). Residual LAI was also measured just after mowing (Table 3).

Volumetric Soil Water Content (θ) was measured before and after irrigation every 0.1 m up to 1 m depth with a neutron probe (Model 503 DR CPN®, Vectra, la Verrière, France). The Fraction of Transpirable Soil Water defined by Lacape et al. (1998) was evaluated on 0.6 m depth (Merot et al., 2007). Total Transpirable Soil Water TTSW (Table 3) and the threshold at which crop is impacted by water deficit was also measured with the neutron probe (Merot et al., 2007).

All the agricultural practices carried out on the experimental field were recorded.

Parameter estimation approach

The new model uses 36 parameters that can be potentially adjusted to experimental data. These parameters were sorted into 3 categories: parameters that can be estimated from the literature (22 parameters), parameters that can be evaluated using specific measurements (8

parameters) (Table 3) and parameters that has to be estimated using field data (6 parameters) (Table 4). The parameters evaluated by specific measurements are considered as input data.

Table 4 : the 6 parameters optimized from the optimization procedure

Parameter (N: new parameters of the model after adaptation)	Description of the parameters	Result of estimation	Value proposed in literature (* Adam et al., 2007) or by expert knowledge (**)
RUE_rate (g DM. MJ⁻¹)	Daily potential rate of RUE	0.75	1.6 – 1.8*
LAI_rate (m².m⁻².day⁻¹)	Daily potential rate of LAI	0.3	0.3 – 0.376*
Amplitude_frepro	Maximum increase of RUE_rate during the reproductive stage	1.6	1.47*
LLSmin (degree-days)	Leaf life span	600	500 – 800*
LAI_rate_p1 (m².m⁻².day⁻¹)^N	Parameter for enhancing the RUE and LAI rate in 1st mowing	0.71	
Vent_p1 (m.s⁻¹)^N	Wind velocity from which GLAI and RUE are impacted	6	5-6**

The criterion for the optimization procedure has to be chosen depending on the aim of the study (Wallach et al, 2001). For our study case, it was based on three model outputs that are measured (FTSW, DM and LAI). The criterion that is minimized through the estimation algorithm is:

$$\varphi = \sum_i \frac{(\sum_j \sum_k \sum_l \frac{1}{M_{ijkl}} \sum_m (\ln(\bar{Y}_m) - \ln(\hat{Y}_m))^2)}{a_i^2} + \sum_i \frac{(\sum_j \sum_k \sum_l \frac{1}{M_{ijkl}} \sum_m (\bar{Y}_m - \hat{Y}_m)^2)}{\sigma_m^2} \quad \text{Equation 12}$$

where i is the indices of type of measurements (DM, LAI or FTSW); j the indices of border in the field (border P and T); k the indices of year of measurement (2004, 2005 or 2006); l the indices of mowing during each season production (mowing 1, 2 or 3); m the indices of field data in one independent group of data. a_i^2 and σ_m^2 are explained below. \bar{Y}_m and \hat{Y}_m are respectively the observed values and simulated values for each data defined by i, j, k, l, m and M_{ijkl} is the number of \bar{Y}_m in each independent group of data.

This complex criterion is the sum of two squared errors, weighted by the number of measurements and type of measurements. Its construction can be decomposed in 3 steps:

- In our case, the elementary field data \bar{Y}_m corresponds to the average value of 5 measurements performed the same day, on the same border. They are characterized by a standard deviation. These elementary data are gathered in independent groups of data defined by i, j, k, l which are characterized by a number of elementary data M_{ijkl} . The elementary data in each independent group are strongly correlated and consequently we considered each group as one data. The criterion is the sum of the squared errors of each independent group.
- From a thorough variance analysis of these elementary data, it was shown that the variances of each elementary measurement were not equal. As it was possible for DM and LAI measurements to find a linear relationship (slope = a_i) between the measurements and the variances associated to the elementary data (Fig. 2), the classical log transformation was used to weigh the data.

(iii) The squared errors of each independent group are added per mowing, year then site. For the last addition of the squared errors per type of measure, the range of values observed is quite different between DM, LAI and FTSW. Relative weightings for each type of measurement were chosen to give the same importance to each measurement. We decided to weight the addition of errors per type of measurement by a coefficient that takes into account of the scale of the measure and the errors in the measurements: thus the squared errors were weighted by a_i corresponding to the slope of the linear relationship between the observed values of DM / LAI $\overline{Y_m}$ and their standard deviation (Fig. 2). For FTSW, we have not done any log transformation; we used the mean variation σ^2_m (Fig. 2) (Wallach et al, 2001).

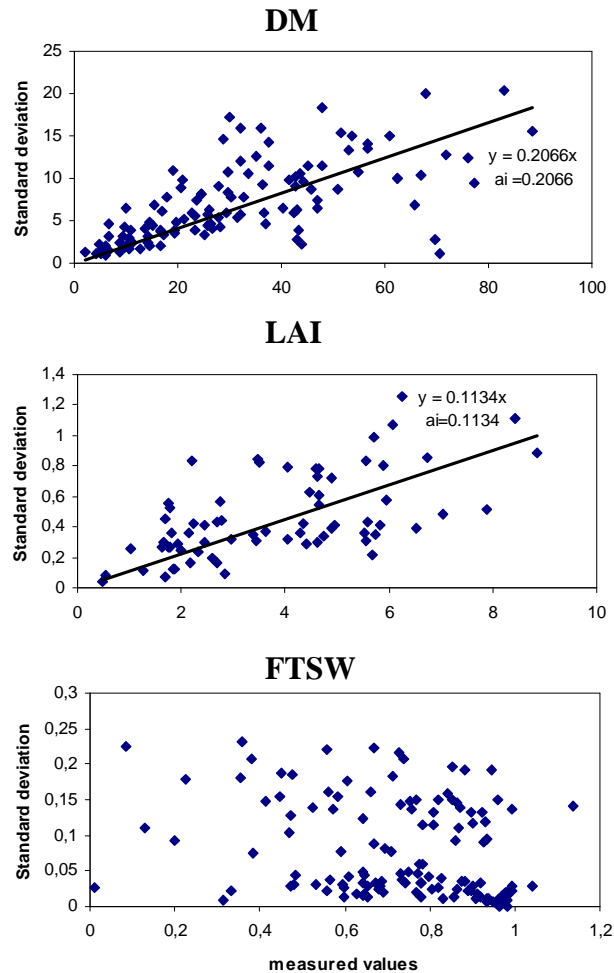


Figure 2: Measured data from field measurements versus standard deviation associated to these data

Model evaluation

Kobayashi and Salam (2000, cited by Wallach et al, 2006) showed that the Mean Squared Error MSE could be decomposed into 3 terms (eq. 13): Bias (eq.14), SDSD (eq. 15) and LCD (eq. 16 and 17) in order to identify the different types of error. It is possible this way to evaluate the contributions of the different type of errors to the global error and to improve model simulations by concentrating efforts on most important deviations.

$$\text{MSE} = (\text{Bias})^2 + \text{SDSD} + \text{LCD} \quad \text{Equation 13}$$

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_i^N (Y_i - \hat{Y}_i) \text{ Equation 14}$$

$$SDSD = (\sigma_{iy} - \sigma_{\hat{y}i})^2 \text{ Equation 15}$$

$$LCD = 2 \cdot \sigma_{yi} * \sigma_{\hat{y}i} (1 - r) \text{ Equation 16}$$
 with r correlation coefficient is defined the following equation:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(Y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{y})^2 * \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \text{ Equation 17}$$

The cause of model bias is often easy to identify. SDSD is related to the difference between deviation of measurements and simulated values. It is linked notably to the way that model represents stresses. LCD error is on the contrary not easy to analyse. In this work, an effort was made to limit Bias and SDSD.

To minimize the chosen criterion we used the solver tool in Excel as the number of parameters to modify was quite small.

A sensitivity analysis was performed. Variations by +/- 60% of each optimized parameter were tested. We observed the model responses thanks to the variations of the criterion ϕ .

Predictive quality is evaluated through 2 estimators: MSE (eq. 13) and the mean squared error of prediction (MSEP) obtain by cross-validation (Batchelor et al, 1994). It consists of splitting the overall available dataset in 2 independent datasets (Table 5), then adjusting parameters on the 1st dataset and evaluating MSEP for FTSW, DM and LAI on the 2nd dataset. Estimator of MSEP is then defined by the mean value of MSE obtained.

Table 5 : The splitting of the data in independent dataset.

	DATA FOR PARAMETER ESTIMATION	DATA FOR EVALUATION
Splitting 1	Field A Border T years 2004 and 2005	Field A Border P year 2006
Splitting 2	Field A Border T years 2005 and 2006	Field A Border P year 2004
Splitting 3	Field A Border T years 2004 and 2006	Field A Border P year 2005
Splitting 4	Field A Border P years 2004 and 2005	Field A Border T year 2006
Splitting 5	Field A Border P years 2005 and 2006	Field A Border T year 2004
Splitting 6	Field A Border P years 2004 and 2006	Field A Border T year 2005

RESULT

The values of the estimated parameters are given in (Table 4). They are quite coherent with what was proposed by Adam et al. (2007) except for RUE_rate.

The dynamic of DM is correctly fitted. A pause of biomass production due to some water deficit is correctly simulated by the model (Fig. 3, Fig. 4). The model simulates the absolute values of biomass during the 1st mowing even though the beginning of production season was not so easy to evaluate (short-term effects of winter). The 2nd mowing is often under-estimated (Fig. 3, Fig. 4) and the 3rd mowing was sometimes under-estimated (in 2 cases among 6). Finally, concerning the yields (Fig. 5), the mean error of calculation for each mowing seemed important (RMSE = 0.53) but were mostly explained by errors during the 3rd mowing.

The dynamic of LAI during the season was respected (Fig. 3, Fig. 4). However, the errors on the values of LAI calculated were sometimes important. We noted large differences for some dynamics in 2005 (1st and 3rd mowings) or for the 2nd mowing in 2006. The LAI before mowing was often under-estimated.

For most of the data sets, the dynamic of soil drying was well simulated (Fig. 3, Fig. 4). In 2005 and 2006, FTSW was sometimes under-estimated (border P in 2006) sometimes over-estimated (border T in 2005), no particular trend was noted. In 2004, FTSW was clearly over-estimated for values lower than 0.4 (not shown).

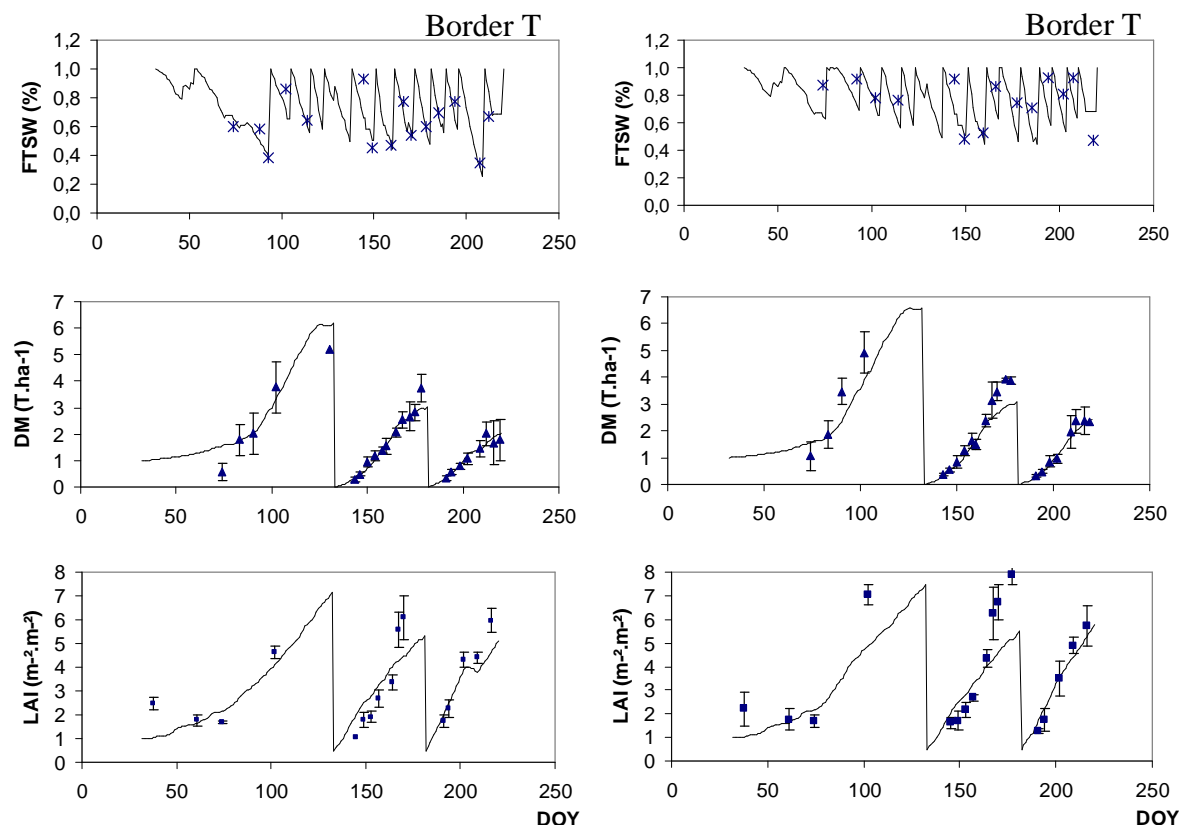


Figure 3: simulated values from the model and observed values in 2006 for FTSW, DM and LAI.

Several representation of the residues versus observed data were performed. The observed data used here: average wind, cumulated ET_0 , cumulated PET, cumulative temperature, day of year, mean FTSW, cumulative rainfalls or cumulative global radiation. The residues analyse revealed that there was no trend for FTSW residues (not shown). For DM, we observed that the errors of simulation were most important for the 3rd mowing and for average FTSW higher than 0.75 (not shown). Concerning LAI residues (not shown), the residues showed that the model did not take into account the totality of the effect of water deficit and wind on LAI during the growing season.

The Mean Squared Error is principally explained by the term LCS (not shown). Bias errors were mostly reduced except for LAI (2005 border T) and for FTSW (2006 border P). Considering the type of error, we concluded that the main improvements on the model were performed.

Firstly, we can observe that there were not any local minima that could devalue the optimization process. Secondly, the model is mainly sensitive to 2 parameters: LAI_rate corresponding to the maximal growth rate of LAI and RUE_rate corresponding to the rate of

maximal increase of RUE. When calculating the ratio between the variation of the criterion and the variation of the parameter, this sensitivity coefficient is high (not shown). On the contrary, model is not too sensitive to LLSmin, amplitude_repro, Vent_p1 and LAI_rate_p1; the ratio between the variation of the criterion and the variation of the parameter is low. When comparing to the initial model (Adam et al, submitted), it appeared that the new model is less sensitive to Radiation Use Efficiency (RUE_rate) and Leaf life span (LLSmin).

Fig.6 presents the evolution of the criterion ϕ for various values of parameters tested.

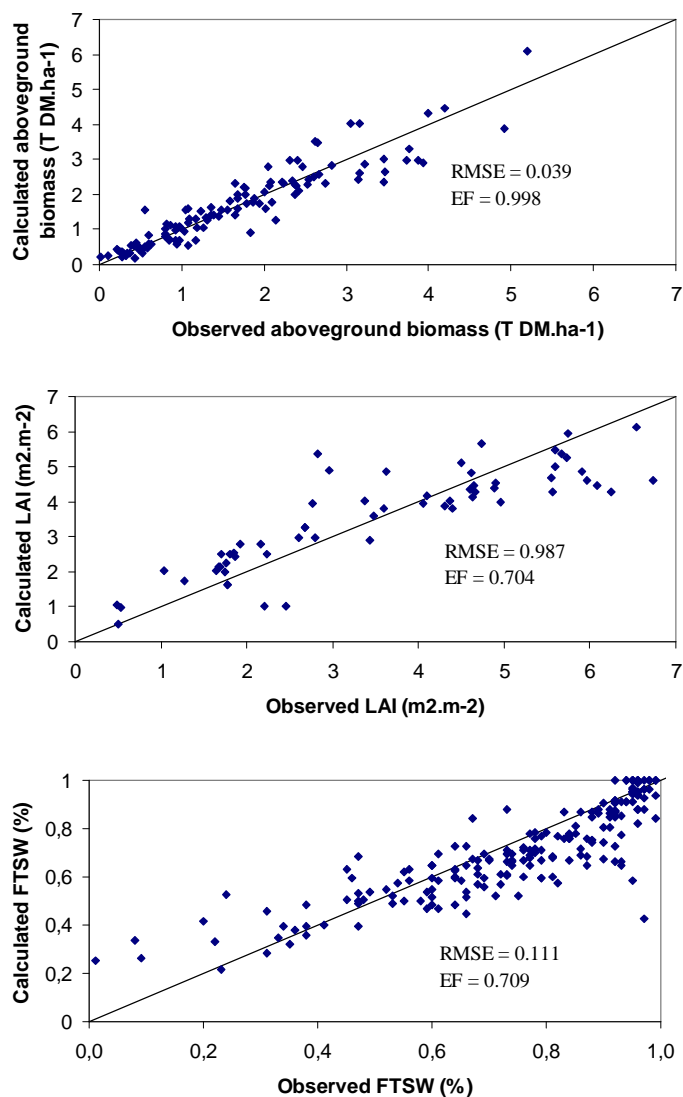


Figure 4: Calculated vs. Observed values for DM, LAI and FTSW measurements for the optimized parameters (Borders P and T, 2004-2006).

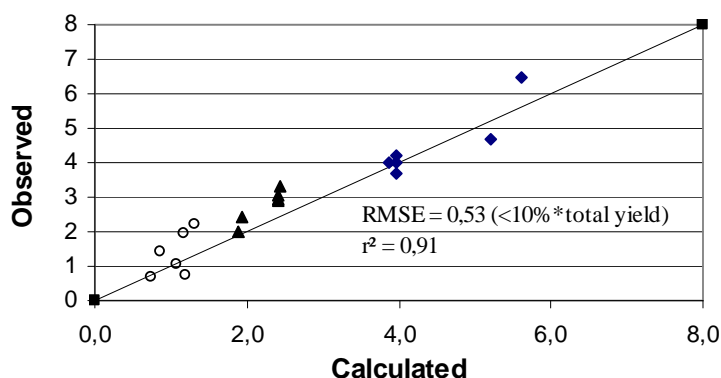


Figure 11 : Observed yield versus calculated yields for borders T and P, 2004-2006

◆ 1st mowing, ▲ 2nd mowing, ○ 3rd mowing

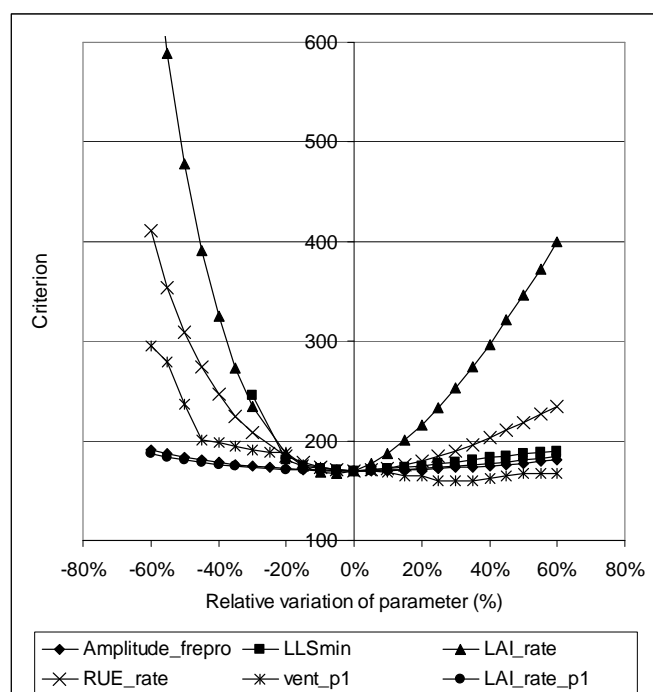


Figure 12 : sensibility of the criterion ϕ to the relative variations of the six parameters optimized.

The study of the estimators of MSEP using cross-validation methods showed that the error of measure was not so high. For DM, the error of measurement is around 0.145 T.ha^{-1} . Concerning LAI and FTSW, a respective error of $0.092 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ and 0.0155% can be predicted (Table 6).

Table 6: Estimation of MSEP with MSE and MSE obtained by cross-validation for FTSW, LAI and DM.

Measure	MSE for optimization unites	MSE by cross validation	$\% = \frac{\text{MSE}_{\text{cross validation}}}{\text{MSE}_{\text{optimization}}}$
DM	0.12 T.ha ⁻¹	0.17 T.ha ⁻¹	+ 40%
LAI	0.09 m ² .m ⁻²	0.094 m ² .m ⁻²	+ 6%
FTSW	0.012 %	0.019 %	+ 48%

DISCUSSION AND CONCLUSION

The parameters adjustment algorithm presented in this paper was proposed to reach two objectives: get an automatic reproducible procedure for parameterization and adapt a crop model to our study case. Considering the first point, the criterion used in this study was based on all the outputs expected in the model. Because we mixed DM, LAI and FTSW, the optimisation process integrated directly the three outputs instead of having three hierarchical optimisation processes to synthesise. After parameters optimisation, the calculated values were correctly simulated whatever the output to consider. However, the choice of parameters to adjust and the definition of the criterion were crucial. An important phase was the weighting of LAI, DM and FTSW errors in the criterion. An observation phase on the data was necessary to propose coefficients. Depending on the weighting, different sets of parameters can be obtained (Wallach et al, 2001). Here, we can conclude that these weightings were appropriate.

Thanks to the reproductive procedure and a detailed analyse of errors, it was possible to implement new equations in the model and to integrate the specificities of the multi-species and Mediterranean grasslands studied. The model was improved keeping in mind the well-known bottle-neck problem: number of parameters versus quality of simulations: we only implemented what was strictly necessary by separating problems as suggested by Wallach et al, 2001. The model was improved with a wind effect (on biomass, LAI and ETa), with a soil water balance and with effects of the variations of botanical composition. Previously the model was mainly built for grasses with an important effect of the reproductive phase and dicotyledons were integrated through the hypothesis that grasslands were sorted in plant functional types (Adam et al, submitted). In our case, it was mandatory to introduce differential growth from dicotyledons to grasses. Therefore, considering the interest of functional types, we decided only to separate the 1st mowing from the others and the RUE potential of grasses from RUE potential of other species. The errors were reduced, notably during the 1st mowing. Studying the errors was a good way to improve simulations.

We did not take into account the complex processes occurring during winter on the crop (pasture defoliation, reserves remobilization) and the effect of nitrogen on plant growth even though LAI growth mainly depends on nitrogen (Gastal et al, 1992). Sharing the hypothesis of below-ground dominance (Burke et al., 1998), we choose to represent the crop in this model without nutrients module and consequently with the constancy of nitrogen supply for the whole season. This could explain some errors in the simulation particularly at the beginning of the season after winter when the standard deviation of the measurements is high. In fact, nitrogen is principally supplied by the sheep urea during the winter pasture and net increase of biomass strongly depends on heterogeneity of nitrogen furniture and pasture. Considering the simplifications we have made, we can conclude that DM, LAI and FTSW are correctly simulated. Despite FTSW is not a cumulative indicator, the dynamic of soil drying was respected in a range of FTSW from 0.4 to 1. The dynamic of LAI accumulation was correctly

simulated until LAI equals to 4.5. In the perspective of building a tool for conceiving cropping systems, it was important to well simulate LAI until the value of 4 (Mailhol et Merot, 2007). Thus, according to the needs of this study, we can consider that LAI simulations were satisfactory.

The optimization process let to adapt the grassland model to the multi-species Crau grasslands. We saw that results were acceptable, but now considering the use of the model one can wonder as if the predictive value sufficient? The evaluations of MSEP have to be confronted to the acceptable error of simulation defined by the users of the model. It is quite difficult to conclude on FTSW and LAI because this information will be used in other models. Thus it is necessary to evaluate how this predictive error is propagated through these models. For DM, the predictive error is smaller than 10% which is the limit of acceptability according to farmers.

This successful adaptation of the multi-species grassland model was the first step in the conception of a tool to evaluate cropping systems. A decision support system is under development to assess the conception of irrigated grassland cropping systems. Two components composed the biophysical system in our study case due to the specificities of border irrigation: the plant-soil component and the irrigation component. The plant-soil model is ready as presented here. We adapted an irrigation model at field scale (Mailhol and Merot, 2007). In a second step, it will be necessary to couple the irrigation model and crop model. This phase is to be done. Then, when coupled, these models had to be completed by an approach on the technical sub-system under the influence of the decisional system. Thus a decision model is also under development (Merot et al., 2007).

Acknowledgements: A. Merot received funding from National Association for Technical Research and the Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale. The authors would like to thank Mr François Charron in charge of the experiments in the Merle Domain for his valuable assistance in the data collection.

REFERENCES

- Allen, R.G., Pereira L.S, Raes, D., Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56 FAO, Rome.
- Balland P., P. Huet, E. Lafont, J.P. Leteurtriois and P. Pierron. (2002). Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance - Contribution à un Plan Durance. Paris: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Equipeement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer.
- Breda N.J.J., (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54 (392): 2403-2417.
- Brisson N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Dürr, B. Nicoulaud, G. Richard, N. Beaudouin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard, & R. Delecolle. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance - I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson N., & Wery, J. (2002). Introduction aux modèles de culture. Paper presented at the Ecole Chercheur Modélisation Le Croisic 14-19 octobre 2002.
- Caldwell M. M. (1970). Plant gas exchange at high wind speeds. *Plant physiology*, 46, 535-537.
- Corson M.S., R.H. Skinner, & A.C.A. Rotz. (2006). Modification of the SPUR rangeland model to simulate species competition and pasture productivity in humid temperate regions. *Agricultural systems*, 87, 169-191.

- Cros M.J., M. Duru, F. Garcia, & R. Martin-Clouaire. (2003). A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie*, 23, 105-122.
- Daudet F.A., X. Le Roux, H. Sinoquet, & B. Adam. (1999). Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions. *Agricultural and Forest Meteorology* 97, 171-185.
- Diaz S., & M. Cabido. (1997). Plant functional types and ecosystem functions in relation to global change. *Journal of vegetation science*, 8, 463-474.
- Duru M., & B. Hubert. (2003). Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. *Agronomy*, 23, 689-703.
- Gastal F., G. Belanger, & G. Lemaire. (1992). A model of the leaf extension rate of tall fescue in response to nitrogen and temperature. *Annals of Botany*, 70(5), 437-442.
- Herrero M. (1997). Modelling dairy grazing systems an integrated approach. PhD thesis. University of Edinburgh, Edinburgh.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K. Muys B., Coppin P., Weiss M., Baret F., (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I: Sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19-35.
- Kallarackal J., & C.K. Somen. (1997). An ecophysiological evaluation of the suitability of *Eucalyptus grandis* for planting in the tropics. *Forest Ecology and Management*, 95, 53-61.
- Lacape M.J., J. Wery, and D.J.M. Annerose. (1998). Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field Crops Rech.*, 57, 29-43.
- Mailhol J.C., & A. Merot. (2007) SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. submitted.
- McCown R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth, & D.M. Freebairn. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural systems*, 50, 255-271.
- Meynard J-M., AF. Aggeri, J.B. Coulon, R. Habib, & J.P. Tillon. (2006). Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants - rapport du groupe de travail: INRA.
- Merot A., J. Wery, C. Isberie & F. Charron. (2007). Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *European Journal of Agronomy*, In Press.
- Mailhol J.C., & A. Merot. (2007b). SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region, *Irrigation Science*, submitted.
- Oguntunde P.G., N. Van de Giesen, & H.H.G. Savenije. (2007). Measurement and modelling of a rain-fed citrus orchard under subhumid tropical conditions. *Agricultural Water Management*, 87, 200-208.
- Olioso A., T.N. Carlson, & N. Brisson. (1996). Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 41-59.
- Pervanchon F. (2004). Modélisation de l'effet des pratiques agricoles sur la diversité végétale et la valeur agronomique des prairies permanentes en vue de l'élaboration d'indicateurs agri-environnementaux. Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Rana G., & N. Katerji. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 13, 125-153.
- Rinaldi M. (2001). Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 49, 185-196.
- Ritchie J.T., & S. Otter. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. . In Springfield (Ed.), *ARS Wheat yield project. ARS-38*. Missouri. 159-175.
- Santos A.M., M. Cabelguenne, F.L. Santos, M.R. Oliveira, R.P. Serralheiro, & M.A. Bica. (2000). EPIC-PHASE: a model to explore irrigation strategies. *Journal of agriculture and Engineering. Res.*, 75, 409-416.
- Sato T., O.S. Abdalla, T.Y. Oweis, & Sakuratani, T. (2006). Effect of supplemental irrigation on leaf stomatal conductance of field-grown wheat in Northern Syria. *Agricultural Water Management*, 85, 105-112.
- Schapendonk A.H.C.M., W. Stol, D.W.G. Van Kraalingen, & B.A.M. Bouman. (1998). LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9, 87-100.

- Stoate C., N. D. Boatman, R. J. Borralho, C. Rio Carvalho, G. R. de Snoo, & P. Eden. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of environmental management*, 63(4), 337-365.
- Stockle C.O., S. Martin, & G.S. Campbell. (1994). CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, 46, 335-359.
- Takagi K., T. Tsuboya, & H. Takahashi. (1998). Diurnal hystereses of stomatal and bulk surface conductances in relation to vapour pressure deficit in a cool-temperate wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 177-191.
- Tremblay M., & Wallach, D. (2004). Comparison of parameter estimation methods for crop models. *Agronomy*, 24, 351-365.
- Wallach D., B. Goffinet, J.E. Bergez, P. Debaeke, D. Leenhardt, & J.N. Aubertot. (2001). Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93(4), 757-766.
- Wallach D., D. Makowski, & J.W. Jones. (2006). Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications.
- Welles, J.M. and Norman J.M, (1991). Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal* 83(5): 818-825.

Appendix : variables and parameters

The model calculations begin on 1st February. The Available Soil Water ASW, the residual LAI and DM, the initial LAI and DM are initialized. Then the model turns each day.

State (*Italics*) and intermediary variables of the model

Name	Unit	Description (Initial values)
Climatic and temporal variables		
DOY	unitless	Day of year
ST	°C	Sum of temperature from 1 February to day d (0)
Tb	°C	Base temperature
Variables of soil water		
ETa	mm	Actual evapotranspiration on day d
ASW	mm	<i>Available Soil Water</i> on day d (SWC_year)
FTSW	unitless	Fraction of Transpirable Soil Water on day d
Fwi	unitless	Coefficient of Water Stress on day d
Drainage	mm	Cumulative drainage on day d (0)
Variables of RUE calculation		
RUE	g DM.MJ ⁻¹	Radiation Use Efficiency on day d
RUE G	g DM.MJ ⁻¹	Part of Radiation Use Efficiency due to grasses on day d
RUE L	g DM.MJ ⁻¹	Part of Radiation Use Efficiency due to other species than grasses on day d
fT	Unitless	Temperature function of RUE on day d
fd	Unitless	Seasonal function of RUE on day d
frepro	Unitless	Reproduction function of RUE on day d
Variables of PAR calculation		
PARa		Photosynthetically active radiation intercepted on day d
epsi		Radiation interception Efficiency on day d
Variables of LAI calculation		
LAI	Unitless	<i>Leaf Area Index (LAI_res_0)</i>
LAIres	Unitless	Pool of LAI for the calculation of senescence on day d (LAI_res_0)
Variables of DM calculation		
DM	t.Ha ⁻¹	<i>Aboveground biomass accumulated in dry matter</i> on day d (DM_res_0)
Dmgrowth	t.Ha ⁻¹	Aboveground biomass growth on day d
Dmres	t.Ha ⁻¹	Pool of DM for the calculation of senescence on day d (DM_res_0)
Dmsen	t.Ha ⁻¹	Part of biomass lost by senescence on day d

Input variables in the model

Name	Units	Description
Climatic data		
Tm	°C	Daily mean temperature on day d
Wind	m.s ⁻¹	Wind speed on day d
P	mm	Rainfall water supply on day d
Rg	MJ.m ⁻²	Global solar radiation on day d
ETref	mm	Reference Evapotranspiration on day d
Soil data		
TTSW	mm	Total Transpirable Soil Water
SWC_0	mm	Initial ASW
FTSW_1	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_2	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_fwi_1	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_fwi_2	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
Plant data		
Tc	°C	Thermal time of the beginning of reproduction stage
Tflo	°C	Thermal time for flowering
L1	-	Proportion of other species than grasses for the 1 st mowing
L2	-	Proportion of other species than grasses for the 2 nd mowing
L3	-	Proportion of other species than grasses for the 3 rd mowing

Technical data		
I	mm	Irrigation water supply on day d
Ni	-	Indices of nitrogen status
LAIres_coupe	-	Residual LAI after a mowing
Dmres_coupe	t.Ha ⁻¹	Residual DM after a mowing
Coupe	-	Number of the mowing

Parameters of the model (calculated from others parameters, biblio, adjustable)

Name	Units	Source	Description
------	-------	--------	-------------

Adjustable parameters

CHAPITRE V
FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TECHNIQUE ET
ELABORATION D'UN MODEL CONCEPTUEL DU
SYSTEME DECISIONNEL A L'ECHELLE DE
L'EXPLOITATION AGRICOLE

V. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TECHNIQUE ET CONCEPTION D'UN MODELE CONCEPTUEL DU SYSTEME DECISIONNEL A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

V.1. Objectifs et démarche

Après l'étude du système biophysique, nous nous intéressons au système technique sous l'influence des processus décisionnels (Figure I.1). Dans ce dernier chapitre de résultats, nous analysons successivement le fonctionnement du système de culture prairial à l'échelle de l'exploitation agricole puis nous proposons un modèle conceptuel du système décisionnel de la gestion de l'irrigation de la prairie en relation avec les autres opérations techniques du système de culture. Les objectifs de ce chapitre sont :

- (1) d'analyser et de représenter les actes techniques dans le temps et dans l'espace ;
- (2) de dégager les contraintes du système de culture notamment de l'irrigation,
- (3) d'analyser les interactions entre l'irrigation et les autres pratiques agricoles,
- (4) de dégager les principales décisions et les échelles spatiales des décisions du système de culture ;
- (5) d'analyser comment les logiques décisionnelles déterminent les pratiques notamment l'irrigation,
- (6) de modéliser le système technique sous l'influence du système décisionnel.

Cette partie fait l'objet d'un article soumis à *Agricultural Systems*.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons dans un premier temps enquêté des exploitations agricoles. Dans un second temps, nous avons élaboré à partir des données de l'enquête un modèle conceptuel des décisions de l'agriculteur concernant son système de culture prairial en relation avec la gestion de l'eau.

V.2. Méthodologie

La méthodologie de l'enquête est détaillée dans le chapitre II. Elle est basée sur l'analyse du fonctionnement du système de production (Capillon et al., 1993) croisée avec l'analyse de la gestion de l'eau. Le concept du 'modèle d'action' (Aubry et al., 1998b) a été appliqué à notre cas d'étude en intégrant les spécificités de la conduite de la prairie et de l'irrigation à la planche.

Plusieurs travaux font état de l'élaboration de modèles décisionnels pour la gestion de l'irrigation par aspersion (Leroy et al., 1997 ; Bergez et al., 2001). Nous avons choisi de reconstruire un modèle décisionnel adapté aux spécificités de l'irrigation gravitaire en commençant par l'élaboration du modèle conceptuel des décisions. L'écriture du modèle est basée sur l'identification de règles de décision (RDD) (Bergez et al., 2006) en lien avec l'irrigation. Ces RDD sont traduites sous forme de conditions booléenne: "IF <indicateur><opérateur><seuil> ALORS <action 1> SINON <action2>".

V.3. Résultats

V.3.1. Analyse du système de culture et de la gestion de l'irrigation

L'analyse des enquêtes permet d'établir l'itinéraire technique détaillé (Sebillotte, 1978). Au cours de la saison de production des prairies, deux opérations culturales s'avèrent plus importantes que les autres : la coupe et l'irrigation. Des interférences entre les deux pratiques sont observées, ce qui conduit à fixer une priorité (Sebillotte et Soler, 1990 ; Esquirol et Lopez, 1999) entre les deux. Au printemps et à la fin de l'été, la coupe est prioritaire sur l'irrigation car les conditions de séchage au champ sont plus défavorables qu'en été. En milieu d'été, lorsque les besoins en eau de la prairie sont maximums, l'ordre s'inverse et l'irrigation devient prioritaire.

L'organisation spatiale des chantiers (Morlon ; 2005) n'est pas fixe. Les agriculteurs adaptent leurs pratiques en fonction du débit et des horaires d'accès à l'eau à la prise en tenant compte de la structure spatiale de l'exploitation agricole mais aussi du réseau interne de distribution de l'eau.

Notre enquête montre que les échelles de décision sont variées tant pour la coupe que pour l'irrigation. La plus petite échelle de décision pour l'irrigation est la planche d'irrigation, puis la parcelle, le groupe de parcelles associées à une voie d'eau et enfin l'exploitation agricole. Pour la coupe, la plus petite échelle est la parcelle, puis le groupe de parcelles de même maturité puis l'exploitation. Cinq décisions sont prises en matière d'irrigation : (i) la décision de démarrer et (ii) celle d'arrêter l'irrigation, (iii) la décision d'adapter l'irrigation en cas de pluie ou (iv) de coupe et (v) la décision de l'ordre d'arrosage des planches d'irrigation.

Nous n'avons pas mis en évidence d'interactions significatives entre le système de culture prairial et le système d'élevage lorsque les deux sont présents sur la même exploitation. Les

pics de travail, la répartition de la main d'œuvre, l'utilisation de l'espace sont fortement dissociés. Il en résulte deux systèmes techniques distincts en matière d'économie et de technicité.

Enfin, les principales contraintes de production – contraintes pédoclimatiques, de distribution d'eau et de filière du foin de Crau, sont extérieures à l'exploitation agricole. Elles sont fortes et limitent les marges de manœuvre des agriculteurs (Papy et al., 1996). Les systèmes de production et les pratiques culturales dont l'irrigation sont donc peu diversifiés dans l'ensemble de la Crau.

V.3.2. Le modèle conceptuel des décisions

Le modèle conceptuel du système décisionnel est construit à partir des résultats de l'enquête. Ce modèle est unique pour l'ensemble des exploitations produisant du foin de Crau. La description détaillée de la structure spatiale de l'exploitation agricole à partir des différentes échelles de décision explicitées précédemment sert de base au modèle décisionnel. Seules les deux principales pratiques culturales pour la gestion de la prairie, coupe et irrigation sont représentées. Cinq séquences décisionnelles, représentant treize décisions élémentaires, composent le modèle : (i) la délimitation de la période potentielle d'irrigation, (ii) le démarrage de l'irrigation, (iii) la priorité entre la coupe et l'irrigation, (iv) et (v) les séquences décisionnelles de la coupe et de l'irrigation. Les contraintes de distribution de l'eau et plus succinctement de main d'œuvre, sont aussi incorporées comme autant de limites à l'exécution des chantiers de coupe ou d'irrigation. Enfin nous avons intégré trois échelles de temps (fraction de jour, jour, saison de production) et quatre compteurs (temps de travail et d'irrigation, nombre de parcelles coupées et nombre de planches irriguées).

Ce modèle conceptuel sera ensuite informatisé pour permettre de tester des règles et couplé avec les modèles biophysiques pour évaluer les conséquences de ces règles (Bergez et al., 2001 ; Keating et al., 2001).

V.4. Article: Analysing farmers practices to design a conceptual model of the decision system that determines the technical model of the farming system: Application to the Crau Hay System

Analysing farmers practices to design a conceptual model of the decision system that determines the technical model of a farming system

- Application to the Crau Hay System -

MEROT A.^{1,2}, BERGEZ J-E.³, CAPILLON A.¹, WERY J.¹

(1) UMR System, SupAgro, bat 27, 2 Place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.

(2) Société du Canal de Provence, Le Tholonet – CS 70064, 13182 Aix en Provence Cedex 5, France.

(3) UMR AGIR, INRA, 31326 Castanet Tolosan Cedex, France

* corresponding author: Fax: +33 (0)561285037; Email : Jacques-Eric.Bergez@toulouse.inra.fr

Abstract

Conventional water management in the Crau plain has to be modified in order to ensure higher water efficiency, hay production and quality as well as lower environmental impacts. As experimental approaches are unsuitable to test such modifications, simulation may then be a good way to innovate. This paper presents the development of a conceptual model of the decision system that determines the technical system of a cropping system on which a simulation model will be based. Interviews were focussed on water management to understand how farmers manage their irrigation and how their decisions determine the technical system of the farm. They were analysed with the concept of ‘model for action’ and gave a conceptual model of the decisional system with the following attributes: 1) spatial and temporal entities relevant for irrigation and hay decision-making; 2) no interaction between grassland cropping system and sheep breeding system; 3) five rules to describe irrigation management in the cropping system, 4) important water distribution constraints. The conceptual model of the decision system integrates two operations in interaction with irrigation management: grazing and mowing, five constraints for irrigation, four timers and the decision-making rules written in a formal “If *Indicator* Then *Action1* Else *Action2*”. This conceptual model will be used to build a Decision Support System linked to a grass growth model and to a hydrological model.

Keywords: Conceptual model, decision system, border irrigation management, constraints, cropping system, model for action, decision rules, grasslands, farming system

Introduction

Climate change, new environmental concerns, increasing energy costs are some of the many modifications of agricultural context that have to be taken into account by farmers. From the different technical operations which compose the crop management system, some are more sensitive to these modifications. Irrigation practice is one of them as it not only depends on context modification but is also using a conflictual resource that has to be shared. Farmers and advisors request new guidelines to modify cropping systems in this new context. However, as experiments are usually too slow to provide an on-time answer, simulations may be an interesting way because: (i) it allows rapid testing of complex combinations of socio-economic and pedoclimate context; (ii) it allows virtual experiments on cropping systems in these context with almost no costs, once the model has been developed; (iii) it allows simulating externalities that could be difficult to measure (Matthews, 2002).

To simulate cropping practices and their impacts on the biophysical system (Rapidel et al., 2006), one needs a biophysical model that describes the evolution of the biophysical part of the system and provides useful indicators to a second model, a management model that takes into account constraints and trigger actions. This model linking, so-called a biodecisional model, is much more pertinent to

analyse the evolution of practices due to some context modification than a biophysical model on its own (Bergez et al., 2006).

Different authors have represented the farmer's organisation as a planned spatial organisation coupled with a planned temporal organisation of resources (Aubry et al., 1998b). To frame such an organisation, the concept of 'model for action' (Cerf and Sebillotte, 1988; Duru et al., 1988; Sebillotte et Soler, 1990) was proposed to account for this planning and let to externalise and to formalize this unspoken language (Jacobsen, 1994). This conceptual framework is composed of 3 components: (i) the farmer's production objectives, (ii) the planning of practices and (iii) the decisional rules to operate for achieving this planning.

During the past few years, different technical decisions of farmers have been studied and represented with the concept of model for action: crop rotation (Maxime et al., 1995, 1997), planning the allocation of labour and material (Papy et al., 1988; Attonaty et al., 1993), animal waste management (Aubry et al., 2006) or irrigation organisation (Leroy et al., 1997; Labbe et al., 2000; Bergez et al., 2001; Debaeke et al., 2006) tackled. However, few studies gathered several technical decisions and reconstituted the organisation of the whole agricultural production system of a farm (Aubry et al., 1998a). The main way of modeling farmer's practices is the use of the decision rules formalism (Aubry et al., 1998b; Dounias et al., 2002; Bergez et al., 2006). To develop such a model, a thorough understanding of the farmers' decision-making process is requested (Papy, 2000).

In the Crau plain, southeastern France, the traditionnal water management allows the development of multispecific and permanent grasslands which are the basis of local agriculture (Merot et al., 2007). These grasslands are used for hay production: 'Crau hay' with a label of Certified Origin Product. It was shown that irrigation is mandatory in order to keep at a proper level the hay production and quality (Merot et al., 2007). Grasslands are irrigated by border system showing a low efficiency in water use. A great amount of water is lost by percolation which recharges the superficial groundwater (close to 60% of the water applied). Environmental concerns have a strong influence on regional water managers and farmers are encouraged to limit their water consumption (Balland et al., 2002). In addition to water savings, farmers are confronted with a labour issue: irrigation is strongly time-consuming and does not fit to conventionnal schemes of labour rights when there is a need of employees.

For irrigation management, the model for action should include four components: i) the various decision-making rules, and the descriptive variables of the planning schedules (Aubry, 1998b), ii) the main constraints, iii) the description of the equipment and water resource context and iv) a timer to deal with the temporal organisation, (Bergez, 2001). Such a model should answer two main questions: when to irrigate and how much to supply (Bergez, 2002)? For irrigated-hay production, one has also to understand the predictable and plannable part of the current organisation at the farm level as irrigation and cutting may be conflictual (Aubry et al., 1998a).

The aim of this paper is to present the conceptual model of the decision system that determine the technical system of the hay cropping system taking into account the main constraints and interactions between the two main technical operations. In a first section, we describe the survey used to build the model. In a second section we extract the importation information that will structure the model. In a last section we present the model of the decision system and discuss its use.

Material and methods

The study area

The work was carried out in the Crau plain, southeastern France (43°38 N, 5°00 E). It is a 600 km² flat territory bordered at the East by the Berre Lake, at the West by the Rhone River, at the North by the Alpilles Mountains and at the South by the Mediterranean Sea.

The Crau plain is under a mediterranean climate. Winters are mild with mean temperature between 5 to 10°C. Summers are warm; the mean temperature is around 25°C. Cumulative rainfalls reach 600 mm per year but are concentrated during the end of production season in

autumn. The climatic water deficit is around 750 mm (Merot et al., 2007). The summers are dry and irrigating is a necessity. The particularity of the Crau plain is the wind: On average, the wind blows during 110 day per year at more than 16 m.s^{-1} .

The soil is a calcic luvisol (FAO, 1981) with an irrigic upper horizon (5% stones), over an intermediate layer of loamy sand (from 15% to 75% rocks) and a petrocalcic horizon. The thickness of the soil varies from 0.2 m to 1 m, creating heterogeneity regarding water stress for hay in summer.

Half of the area is devoted to agriculture. Six agricultural production systems are found on the Crau territory: cereal production, orchards (mainly peaches), vegetables production, cattle breeding (sheeps for meat or bull for bull-fighting), olive trees for oil and hay production. The last three are traditionnal productions and are usually associated on the same farm. Permanent grasslands, the traditionnal crop, represent one third of the area (12 700 ha). One other third of the area used for agriculture is a semi-arid step traditionnally grazed by the sheeps and the last third is used for intensive horticulture. Grasslands are more important in the North of the region. Actually, 442 farms produce hay. Some 159 farmers (10% of the grassland area) have less than 20 ha of grasslands and are part time farmers.

The mean area of grasslands per farm is around 45 ha. Among the 283 full-time farms producing hay, the majority are in the range of 20 to 60 ha of grasslands or in the range 100 to 200 ha. In 37% of farms, breeding is associated with hay production (mostly sheeps). Only 13% of the farms, that produce hay, also produce fruits or cereals.

Grasslands are irrigated by submersion at border scale, on the basis of $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Water distribution is managed by farmers associations, each with its own particularities and is based on a rotational distribution system.

Sample and survey

The sample of surveyed farms is based on a three-key classification (Capillon, 1993) (Table 1). Data are from local agricultural databases.

Table 1: Farm sampling in the Crau area. Sampling was organized along three identification keys according to geographical stratification (sectors A and B), production systems and surface of grassland in the farm. The surveyed farms, represented by an X were chosen within this classification. The grasslands area of the farm is given in parentheses.

Production systems in the farm	Surface of hay in the farm	Geographical sectors	
		Sector A	Sector B
Hay Monoculture	0-20 ha		X (13 ha)
	20-40 ha	X (29 ha)	X (38 ha)
	40-100 ha	X (70 ha before 2006 – 40 ha after 2006)	
	>100 ha	X (128 ha)	
Hay and breeding	20-40 ha		
	40-100 ha	X (69 ha)	
	>100 ha		X (110 ha)

The first key is a geographical one. From the five geographical areas composing the Crau plain, only 2 (A and B) are really concerned with hay production representing a bit more than 60% of the total area of grassland. The second key of classification is based on the production systems. Farms with hay and with or without breeding sheeps (70 % of cattle) are chosen. The third key concerns the surface of grassland in the farm. Three classes with the same number of farms were defined: 20-40 ha, 40-100 ha, more than 100 ha. As it was particularly difficult

to identify farms associating sheep and hay with a surface less than 40 ha and farms producing only hay in the sector B with more than 100 ha, only seven farms were chosen so that they represent a certain diversity regarding irrigation constraints.

The survey was focused on five items: i) a general presentation and history of the farm; ii) the design of the plot layout; iii) the hay production system from technical operations to economy; iv) the water management from farm to field scale; v) the interactions between grassland and sheep breeding. Information was obtained using semi-directive interview. The survey is performed at farm scale but much information at field scale is also collected. It was difficult to interview more farmers because each of these interviews lasted approximatively four hours. Moreover, these results are not used for upscaling to the territory scale, the objective was to meet the principal specificities of irrigation functioning.

A second phase of interviews was performed for four farms among the 7 to complete the first seven interviews. Precisions were asked on the decisions rules and indicators for irrigation management, notably for the spatial order in which irrigation is performed in the different decision units and the causes of variation of this order.

Method to construct and validate the conceptual model

The survey allows collecting a large number of information on irrigation management at farm, field and border scale. A selection was performed between the different information to build the model. The conceptual model was built in a 8-steps process:

- Identification of the important technical operations that interact with irrigation management (Papy, 2001) and the main constraints;
- Identification of logic decisionnal chains;
- Identification of the main timing and spatial scale for decision-making (Papy 2001; Papy and Baudry, 2005; Capillon and Caneill, 1987);
- Identification of the different decisions related to each practice implemented in the decisional chains;
- Hierarchization of the decisions (Sebillotte and Soler, 1990; Esquirol and Lopez, 1999) and choice of the most important for action;
- Description of these decisions and conversion of some actual variables in simulated variables and choice of the form of writing of the rule;
- Identification of timers to represent the temporal organisation of actions;
- Identification of the links with the biophysical system at field scale.

We used the decision rule modeling approach (Aubry et al., 1998b; Bergez et al., 2006) to represent the farmer's decision process. The decision model is composed of elementary decision rules. A decision rule can be seen as a function between some indicators of the states of the system and action to be performed. It is written as a Boolean condition: "IF <indicator><operator><threshold> THEN <action1> ELSE <action2>"

To validate the conceptual model, a two-step process was performed. A list of the hypothesis used to elaborate the conceptual was written down. (i) During the second phase of the interviews, we prepared a serie of questions to assess these main hypotheses. All the farmers interviewed confirmed us these hypotheses. (ii) An expert validation (Girard et Hubert, 1999) was performed with local agricultural advisors. We choose four experts: (i) a local advisor of hay production, (ii) a farmer, (iii) a water administrator, (iv) a neutral actor of the development and research. We used the same serie of questions to assess the main hypothesis and validate the schemes.

Results

Survey analysis

Farming System

The main characteristics of the seven surveyed farms are given in table 2. Surface for hay production varies from 13 to 128 ha. Hay production is associated or not with other agricultural production activities, especially sheep breeding. Labour used for irrigation varies from 1.4 to 3 Man Work Unit (MWU). In farms with less than 50 ha of grasslands, irrigation is performed by the head of the farm. A help from family workers was reported during mowing. For bigger farms, one worker more is employed for 50 ha during all the year. These workers take part at mowing practices. Concerning irrigation, the farmer can perform irrigation either the employee, in one or more independant sectors. An important diversity was observed concerning labour in the farms, it is structured in function of the grassland surfaces. However, only one person is in charge of irrigation management for each independent water access and this diversity do not create a diversity in farm functioning. Resources to irrigate range from 1 to 5 water accesses each corresponding to an irrigation sector. The majority of water resource is provided by a principal chanel and distributed to the farmers by rotation that may creates heterogeneity regarding distribution cost, frequency in the rotation, water flow,

Table 2: Main characteristics of the 7 surveyed farms.

N° exploitation	Localisation	Cattle production	Hay area	other productions (area)	Pumping*	Water resource units	Area per water unit	on-farm labour for hay**	Area per about unit
1	Sector B	no	38 ha	no	no	5	7.6	2.5	15.2
2	Sector A	sheep (1200 heads)	69 ha	no	yes (20 ha)	3	23	2 (1)	34.5
3	Sector B	no	13 ha	no	no	2	6.5	2.(0.5)	6.5
4	Sector B	sheep (1100 heads)	110 ha	no	Yes (50 ha)	5	22	3	36.7
5	Sector A	no	29 ha	Orchards (9 ha)	no	1	29	1.4	20.7
6	Sector A	no	128 ha	Olive trees (20 ha)	no	3	48.7	2.5 (2.5)	51.2
7	Sector A	no	40 ha (70 ha in 2005)	no	no	5	14	2	35

* Grasslands area irrigated by pumping is given in parentheses; ** The number of employees is given in parentheses

In the studied farms, farmers reported that no much evolution in the farm organisation occurred during the last twenty years. Hay production is a part of the family history and farmers produce hay from father to son. The grassland area in the farms is relatively stable and depends on the number of members in the family. Differently, the cattle breeding activity showed more evolution, with the cessation of this activity for several farms.

The decision-making process is driven by three main objectives. Farmers are sensitive to the (i) preservation of the quality and (ii) quantity of hay production as a patrimonial aspect of the region. They also have to deal with (iii) work organisation between the different farm activities.

Farmers are working under important constraints. Three of them have been often reported:

1. Pedoclimatic characteristics limit the choice of agricultural activities. Considering the low potential of the stony soils of the Crau region and the water climatic deficit in summer, the range of crops to be grown is restricted to permanent crops with limited soil tillage. According to the study, grasslands offer the advantage to be complementary to traditional breeding systems, when grown as permanent and irrigated crops and even though irrigation occurs every 10 days with reported water stress.
2. The water distribution constraints have a significant impact on the choice of the crops to be grown. Calendars of water access are inherited from the last centuries. They are quite complex and with no flexibility. In more than 95% of water access, the irrigation network does not permit water on demand. Thus the development of orchards in the territory was only permitted when pumping in the superficial groundwater.
3. Only 10% of the area could be used for forage supply to the sheep. Selling hay is a necessity for economical equilibrium of the farms. The Certified Origin Product Label for the hay gives the farmers a specific access to the market with higher profit. In fact, the COP label guarantees the production of high quality hay with high selling prices (0.15 euro per kilo). However this luxury selling network is only permitted with respect to some production constraints written down in the COP label (maximum number of days between two mowings, border irrigation with 8/10-day frequencies, particular botanical composition).

These strong constraints explain the relative homogeneity of practices in the hay cropping system across the various farm types. The degree of freedom of farmers is limited to tactical decision for irrigation and mowing. These decisions are mainly the choice of the spatial order of practices.

Hay Cropping System

We identified 4 potential interactions between the breeding system and the hay cropping system (Fig. 1):

- (i) The labour peaks for sheep breeding (autumn and winter) do not occur at the same time

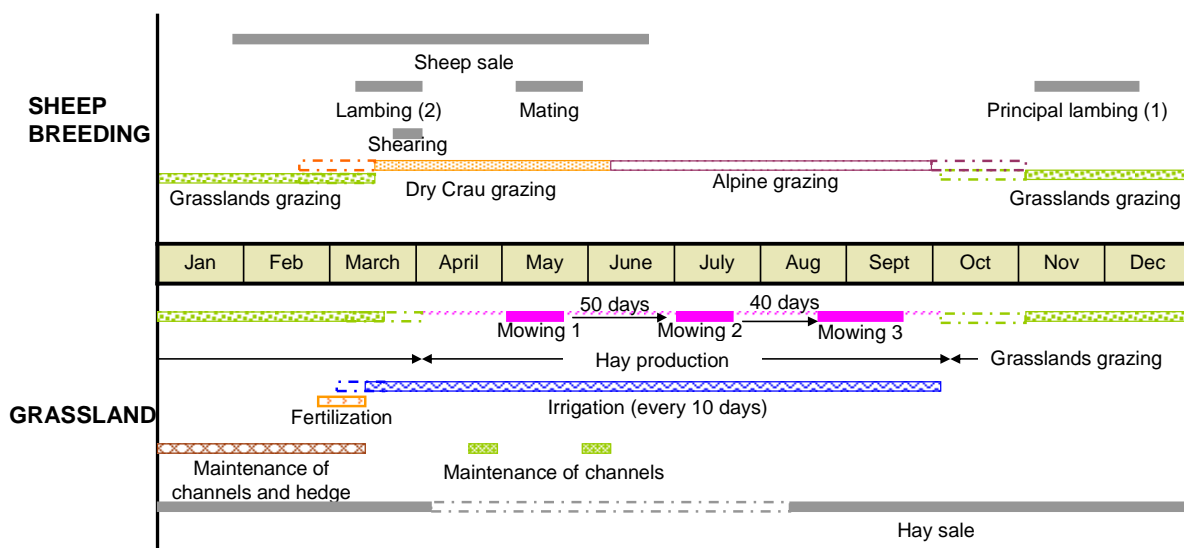


Fig. 1: Chronological organization of practices for hay cropping system and sheep breeding.

Therefore, in the following, we did not consider any interactions in terms of labour management, spatial management, hay consumption as forage, economic interactions and relations between the presence of a breeding system in the farm and the irrigation know-how.

The functioning of the hay cropping system can be seen as the result of a spatial and a temporal organization of production practices under the influence of farm constraints, grasslands requirements and water distribution constraints. The hay production integrates 5 groups of practices that are spread across the year: cutting of hedges and curing of channels, fertilization, irrigation and defoliation including mowing and pasture (Fig. 1). On a temporal axis, the position of these practices is quite the same from one farm to the other. Irrigation is the main practice during the hay production season.

The spatial organisation of irrigation depends on the borders and channels structure. As shown in Fig. 1, only few practices are performed at the same time. The two main activities are mowing and irrigation. They can be associated with different spatial units for decision-making (Fig. 2). Practices related to fertilization and mowing are decided at first at field scale and then at even hay maturity fields groups. Practices related to water distribution, such as irrigation and maintenance channels, are managed firstly at border scale, then at field scale and finally at irrigated sub-area linked to a defined water resource. Most of the time, we observed a relative independence between each water resource.

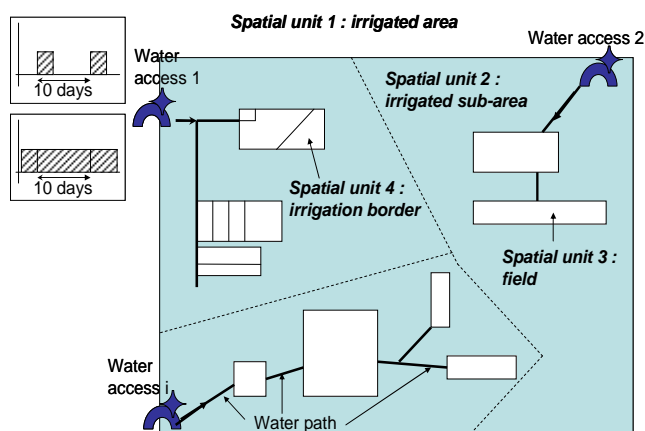


Fig. 2 : Spatial units relevant for decisions on the irrigation and hay production system.

Irrigation management

There is almost no variability in the irrigation management between farms and between irrigation sectors associated to a water access in one farm despite of the choice of a wide range of conditions of water resources. It is due to the fixed calendars for water distribution. Most of the time, farmers are unable to limit the risk of water stress because irrigation depends on the rotation between farms of the water distribution. To overcome this constraint, farmers tend punctually to organize neighbourhood exchanges of water access particularly during mowing. For some years now, farmers have more flexibility due to some decrease of water demand related to the decrease of the number of farms.

Irrigation is the most time-consuming practice in hay cropping system (around 50% of the time required for hay production) and it is also the main production factor for grasslands (Merot et al., 2007). During the second mowing occurring in the driest period in summer, risks of water stress are really strong so that irrigation is the priority. For the first and third mowing, weather is less dry and the constraints of hay drying are more important than for the second mowing. For these two mowings, farmers change their priority and mowing practice becomes the first priority in the farm.

Construction of the conceptual model of the decision system

We wanted to elaborate one conceptual model of the decision system which influences the technical system of the hay cropping system. This model is based on the generalized conclusions of the survey to build a model valuable for all farms. We focused on irrigation decisions in relation to other decisions of hay production.

The structure of the Decision Model

As no model for action was yet developed on this type of interaction between two types of technical operations (irrigation and mowing), some new items had to be added in the model: i) the decision rules model had to take into account the specificities of the crop, considering the repeated mowing practices and the high sensitivity of the crop to water deficit (Merot et al., 2007); ii) the spatial organisation and labour requirements are very important to define action and timing of action; iii) indicators which trigger a decision rule vary with the technical operation and hierarchy of technical operation differs depending on the period of the growing season.

The conceptual model of the cropping system is based on the two main activities of the hay production season: irrigation and mowing (Fig. 3). For irrigation management, we identified 5 decisions rules: (i) the decision to begin and (ii) to end the irrigation season, (iii) the decision to choose the proper border to irrigate, (iv) the decision to organize water distribution during mowing periods and finally (v) the decision to stop and adapt irrigation to the intensity of rainfall events. To structure the decisional model, we splitted the model in 5 decisional chains related to irrigation and mowing management (Fig. 4) that describe the functioning of the whole season: time frame of irrigation season, first irrigation event, priority between irrigation and mowing, mowing and irrigation sequences. These chains are ordered (Esquirol and Lopez, 1999) so as to recompose the decisional logic of farmers then characterized by constraints and also time and spatial scale (Table 3). Three time scales are used in the conceptual model: season, day, hours. Four spatial scales are used: farm, sector associated to a water resource, field and irrigation border. Finally, we included in the conceptual model 9 constraints (Table 3) that have direct or indirect impact on decisions and irrigation management and 4 timers/counters (time of work in the day, time of irrigation in the day, number of fields mown, number of borders irrigated).

Table 3: Presentation of the main constraints identified by the survey and the practices on which they act.

	Constraints	On which practices these constraints act
1	Distance between fields and borders	Order between irrigation and mowing
2	Distance between field and water resource	Order between irrigation and mowing
3	Labour MWU/ha	mowing and irrigation
4	Duration of work/day/MWU	mowing and irrigation
5	Required water transfer time	Irrigation
6	Water access	Irrigation
7	Soil water deficit	Irrigation
8	Hay maturity	Mowing
9	Rainfall	mowing and irrigation

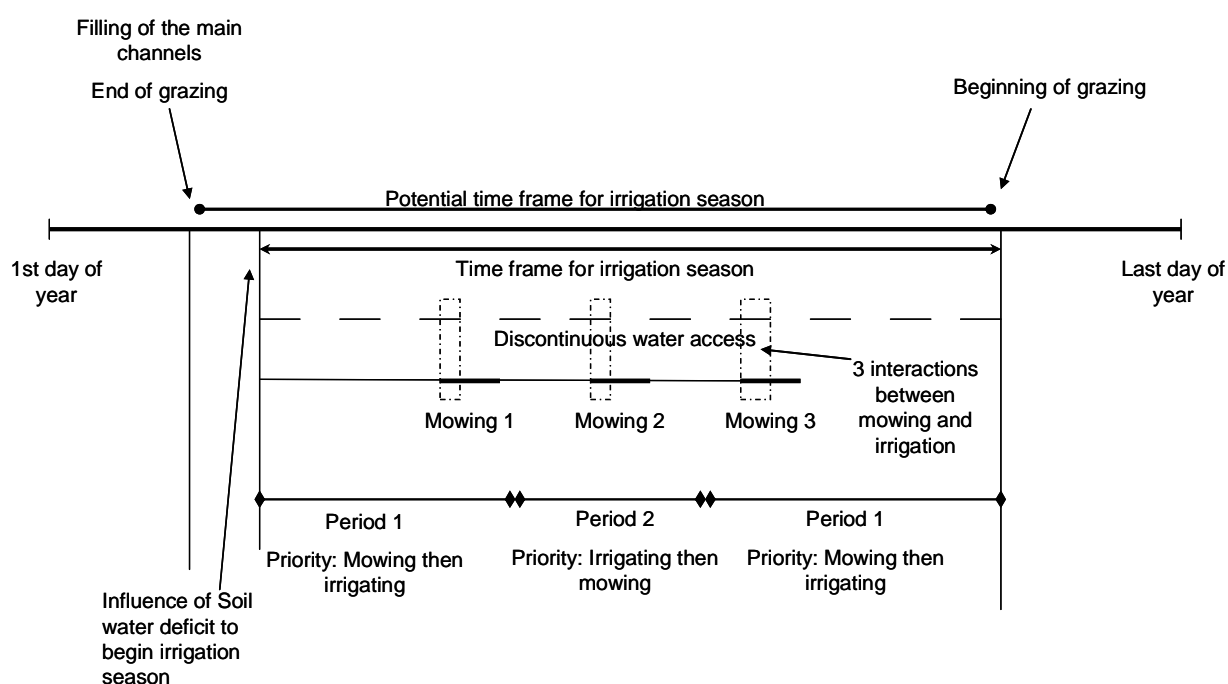


Fig .3: Organisation of the irrigation season. It shows the conditions of the beginning and ending of the irrigation season, the irrigation season with priorities between practices and interactions.

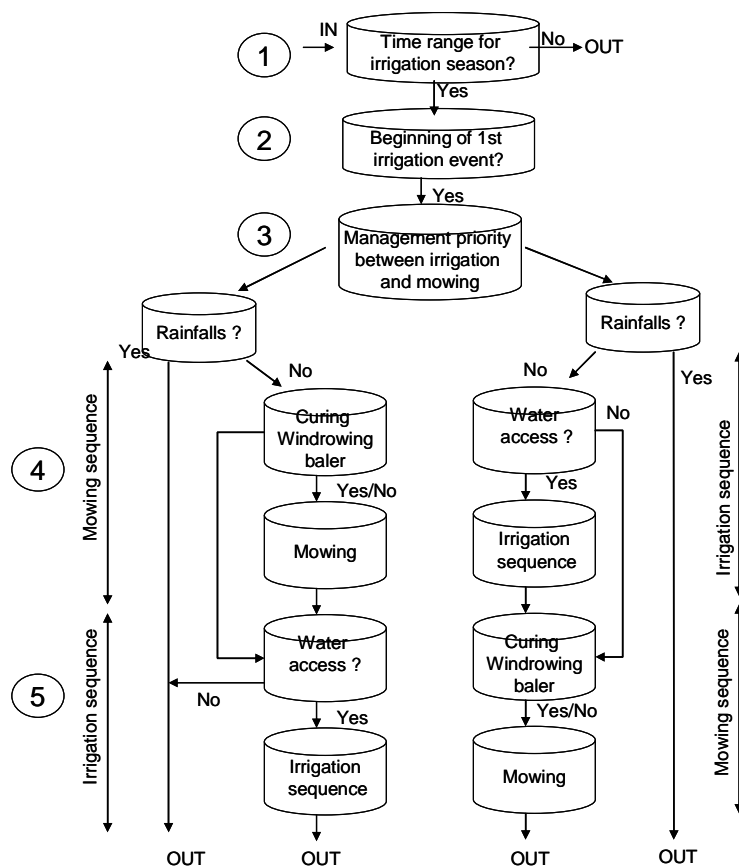


Fig. 4: General algorithms to deal with irrigation management. The conceptual model is divided in 5 decisional sequences.

The decisions in the conceptual model

Each decisional chain is divided into individual decisions. Thus 13 decisions, including the 5 related to irrigation, are modelled (Table 4). These decisions rules are able to generate irrigation management and irrigation calenders for the entire season (Fig. 5). The interviews showed that farmers strongly adapt the spatial management of mowing and irrigation according to the territory of the farm. Thus a particular attention was given to the spatial organization of the fields and borders in the farm through the criterium of distance between the spatial entities (see decision 9 and 13 in Table 4).

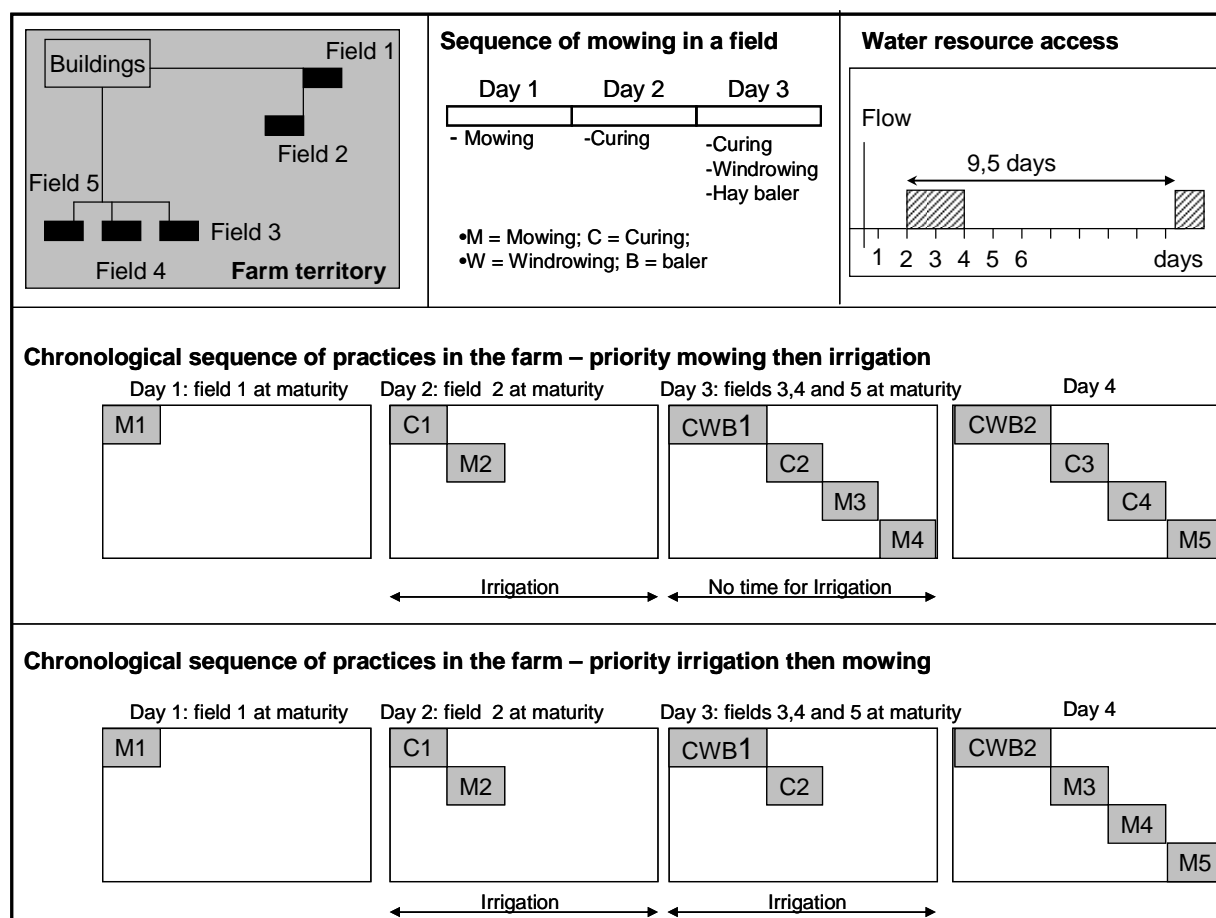


Fig 5: Exemple of irrigation and mowing management according to the description of the spatial organisation, the specific order of mowing practices and water resource access. M: Mowing, C: Curing, W: windrowing, B: baler.

Table 4: Decisional sequences of the conceptual model and the different decisions in these sequences. These decisions are characterized by a time and a spatial scale and also a rule based on an indicator

Decisional sequences	Action at the end of decisional sequences	Decisions in the sequences	Time and spatial scale	Rules	Indicators	Comments
Time frame for the irrigation season	Potential activation of the irrigation season	1- End of grazing	Season / farm	If date < date of end of grazing → activation of irrigation	Calendar date	The only interaction with breeding system
		2- Activation of grazing	Season / farm	If date > date of beginning of grazing → termination of irrigation		Interaction with the water distribution
		3- Activation of the distribution of water in the major channel	Season / farm	If date > date of water availability in the main channel → activation of irrigation		
Beginning of first irrigation event	Activation of the first irrigation event	4- Verification of the level of soil water deficit	Season / farm	If mean water deficit > Threshold of water deficit → activation of first irrigation event	Soil water status	Interaction with the biophysical system
Management of priorities between irrigation and mowing	Choice of the practices operated in priority	5- Arbitration between irrigation and mowing	Day / farm	If date beginning of period 2 < date < date end of period 2 → priority for irrigation	Calendar date	
Irrigation sequence	Sequencing the irrigation in the different borders	6- Verification of water access	Hour / water resource	If there is an access to water resource → activation of irrigation sequence	Water flow at water resource	Interaction with the water distribution
		7- Adaptation of irrigation / rainfalls	Day / farm	If rainfall today → termination of irrigation sequence	Quantity of rain compared to a threshold	Interaction with the environnement (climate)
		8- Arbitration between first border irrigated and the others	Hour / water resource	If first border already irrigated → irrigation of the other borders	Number of borders irrigated in the irrigation event	Necessity to count the number of borders irrigated
		9- Arbitration between borders for irrigation	Hour / border	Sorting of borders → choice a border to irrigate	Distance to water resource, distance to border just irrigated, soil water deficit, borders mowed	Grouping rules conditioning the spatial order of irrigation Interaction with the biophysical system
Mowing sequence	Sequencing the mowing in the different fields	10- Adaptation of mowing, tedding and round-balling rainfall events	Day / farm	If rainfall today → termination of mowing sequence and report of tedding and round-balling	Quantity of rain compared to a threshold	It is important to distinguished the mowing, the tedding and the round-balling as they required specific attention and time Interaction with the environnement
		11- Sequency of collect on all borders	Hour / field	If fields already mown → activation of the collect	Number of fields mown in the mowing event	Separation between collect and mowing
		12- Arbitration between first field mown and the others	Hour / farm	If first field already mown → owing of the other fields	Number of fields mown in the mowing event	Necessity to count the number of fields mown in the mowing event

		13- Arbitration between fields for mowing	Hour / field	Sorting of fields → choice a field to mow, activation of mowing	Distance to the farm and to field just mown, grassland maturity, fields just irrigated	Interaction with the biophysical system
--	--	---	--------------	---	--	---

Validation of the conceptual model

The experts unanimously validated (i) the principal hypotheses, on which the conceptual model is based and (ii) the choice of the principal decisions that represented the irrigation functioning so as the main simplifications. It was not possible for instance to validate the model with a quantitative approach but for further numerical work it will be.

Discussion and conclusion

The interview-based survey elaborated to assess the coherence of grassland management shown that 4 practices are planned during the hay production season: fertilization, maintenance of channels, mowing and irrigation. Each is concerned with an appropriate decision scale. Mowing and irrigation have a different status: they are repeated during the season, respectively 3 times and around 15 times, each time in a different spatial order across fields. The season of production can then be seen as a succession of roughly 18 technical operations part of four agricultural practices. It is essential to take into account this repetitiveness in the decision-making process (Macé et al., 2006).

According to Joannon et al. (2005) and Morlon (2005), farmers adapt their production and practices to the spatial design of the farm territory. In our studied area, this adaptation is mainly due to the water distribution network rather than to the heterogeneity of the soil or to the climate.

We showed that farmers are extremely constrained in their grassland management although there is no significant interaction between the cropping and the breeding system during hay production that is not the case in other regions (Papy, 2001). The principal constraints of the cropping system are external constraints such as water distribution or labour availability. Farmers' degree of freedom (Papy et al., 1996) is reduced to tactical decisions, instead of strategical decisions. The degree of freedom for irrigation and mowing is limited to the choice of the spatial order in which these practices are operated in the farm territory. The capacity to adapt the technical system to the evolution of the farm environment seems rather limited.

On the studied area, due to the high level of constraints, we found an uniformization of technical operations and consequently a diminution of the management diversity on the territory. From discussion with advisors, this result is not the fact of the sampling but is typical to the area.

A precise understanding of the farm functioning is necessary to model the planning process of the technical decisions. From the interviews, and following the concept of 'model for action' (Cerf and Sebillotte, 1988; Duru et al., 1988, Aubry et al. 1998b), we identified and formalised the objectives guiding farmers, the planning schedules reflecting the way practices are ideally operated and a set of decision-making rules to run the scheduled operations (Duru et al., 1988; Sebillotte and Soler, 1990; Papy, 2000). The decision process of irrigation is quite complex. We identified 4 decision levels and we choose here to describe only what was strictly necessary such as the strong interactions between mowing and irrigation. We also had a specific attention to the spatial organisation and the irrigation heterogeneity in the border. It differs from other works carried out on irrigation (Leroy et al., 1997; Bergez et al., 2001).

The conceptual model of cropping system management is presented in this paper as a modelling framework of farmers' decision process. We decided to conceptualize the major decisions in relation to irrigation in order to simplify the complexity of the decisions in terms of spatial and temporal organizations. It can of course reduce the accuracy of the model in particular situations, but in the majority of the technical operations the conceptual model is appropriate and complete enough. We did not take into account some practices such as fertilization or the channel weeding which are operated on days without irrigation and

the duration of mowing per ha. Concerning irrigation management, modifications of the irrigation order according to night and day were also simplified. In fact, farmers try to irrigate large borders during the night to avoid work during night. Finally, collective organization and neighbourhood exchanges of water access were also left behind because it did not seem crucial for irrigation management inside the farm.

Building such decision model requires a lot of information but provides a detailed comprehension of farm functioning and irrigation practices. This approach was proposed, as shown by Papy (2001), for elaborating new cropping systems (Duru and Hubert, 2003; Chatelin et al., 2005; Meynard et al., 2006) or providing advices to farmers and advisors when coupled with simulators of biophysical system in Decision Support System (Papy et al., 1988; Chatelin et al., 2005; Keating and McCown, 2001). For the case of irrigation, there are 2 important examples of the use of the model for action in Decision Support System tool: IRMA (Leroy et al., 1997) and more recently MODERATO (Bergez et al., 2001). These examples developed to improve irrigation strategies were mainly aimed at sprinkler irrigation of cereals and maize (Labbe et al., 2000; Bergez et al., 2002). We developed here an approach of decisions for border irrigation differing from sprinkler irrigation because of three specificities: i) the importance of spatial organisation of borders, ii) the various durations of irrigation events on one border all along the season and iii) the modification of priorities between practices during the season. We propose to use the conceptual model of farm functioning to build a Decision Support System (DSS) linked with a grass growth model (Merot et al., 2007) and a hydrological model (Mailhol and Merot, submitted). This DSS should help in the assessment of modification of practices due to internal changes in the farming system (e.g. in field size and form) or to the evolution of its context (e.g. water availability or climate change).

Acknowledgements

A. Merot received funding from National Association for Technical Research and the Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale. We are grateful to the farmers and local experts for the time spent in interviews.

References

- Attonaty J.M., Chatelin M.H., Mousset J., 1993. A Decision Support System based on farmer's knowledge to assist him in decision-making about work organization and long term evolution. International Seminar of CIGR Models Computer programmes and expert systems for agricultural mechanization. Florenza, Italy.
- Aubry C., Biarnes A., Maxime F., Papy F., 1998a. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture. *Rech. Syst. Agr. Dév.*, 31, 25-43.
- Aubry C., Papy F., Capillon A., 1998b. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agric. Syst.* 56(1), 45-65.
- Aubry C., Paillat J-M., Guerrin F., 2006. A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island. *Agric. Syst.*, 88, 294-315.
- Balland P., Huet P., Lafont E., Leteurtois J.P., Pierron P., 2002. Rapport sur la Durance : Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance - Contribution à un Plan Durance. Paris: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer.
- Bergez J-E, Debaeke P., Deunier J-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P., Wallach D., 2001. MODERATO: An object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol. Model.*, 137, 43-60.

- Bergez J-E., Deumier J-M., Lacroix B., Leroy P., Wallach D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and decisional model. *Europ. J. Agron.*, 16, 123-135.
- Bergez, J.-E., Garcia F., Wallach D., 2006. Representing and optimizing management decisions with crop models. In: « Working with dynamic crop models: Evaluating, analyzing, parameterizing and using them ». Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (Eds.), Elsevier. 175-210.
- Capillon A., 1993. Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques. INA P-G. Paris.
- Capillon A., Caneill J., 1987. Du champ cultivé aux unités de production : un itinéraire obligé pour l'agronome. *Cah. Sci. Hum.*, 23, 409-420.
- Cerf M., Sebillotte M., 1988. Le concept de modèle général et la prise de décision dans la conduite d'une culture. *C.R. Académie d'Agriculture Française*. 74(4), 71-80.
- Chatelin M-H., Aubry C., Poussin J.C., Meynard J-M., Masse J., Vertjux N., Gate P., Le Bris X., 2005. Deciblé, a software package for wheat crop management simulation. *Agric. Syst.* 83(1), 77-99.
- Debaeke P., Nolot J-M., Raffaillac D., 2006. A rule-based method for the development of a crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agric. Syst.*, 90, 180-201.
- Dounias I., Aubry C., Capillon A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agric. Syst.*, 73, 233-260.
- Duru M., Papy F., Soler L.G., 1988. Le concept du modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. . *C.R. Académie d'Agriculture Française*. 74(4), 81-91.
- Duru M., Hubert B., 2003. Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. *Agron.*, 23, 689-703.
- Esquirol P., Lopez P., 1999. L'ordonnancement. Paris. 133p.
- FAO-UNESCO., 1981. Soil map of the world – 1/5.000.000. Food and Agricultural Organisation, Rome.
- Girard N., Hubert B., 1999. Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids. The example of a knowledge-based model on grazing management. *Agric. Syst.*, 59, 123-144.
- Keating B.A., McCown R.L., 2001. Advances in farming systems analysis and intervention. *Agric. Syst.*, 70, 555-579.
- Jacobsen B.H., 1994. Farmer's decision making behaviour: empirical findings from Denmark. In 38th Seminar of EAAE. Copenhagen.
- Joannon A., Souchère V., Tichit M., 2005. Analyse de la gestion spatialisée de l'exploitation agricole à partir de l'utilisation du parcellaire. In : « Agricultures et territoires ». Laurent C., Thion P (Eds.). Paris. Hermès.302p.
- Labbe F., Ruelle P., Garin P., Leroy P, 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *Europ. J. Agron.*, 12, 55-67.
- Leroy P., Deumier J-M., Jacquin C., 1997. IRMA: un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation sur l'ensemble de la sole irriguée. *Perspec. Agric.* 228, 76-83.
- Mace K., Morlon P., Munier-Jolain N., Quere L., 2007. Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agric. Syst.*, 86(3), 115-142.
- Mailhol J.C., Merot A., 2007. SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region, *Irri. Sci.*, submitted.
- Matthews, R., 2002. Cropping and Farming systems. In : “Crop-soil simulation models”, R.B. Matthews, W. Stephens, (Eds.), CABI publishing, 55-68
- Maxime F., Mollet J-M., Papy F., 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cah. Agric.*, 4, 351-362.
- Maxime F., Nicoletti J-P., Leroy P., Papy F., 1997. Donner de la souplesse au choix d'assolement par rotations-cadres. In Actes du colloque 'aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles'. 10-11 december 1997. Laon-France, 85-99.
- Merot A., Wery J., Isberie C., Charron F., 2007 Response of a plurispecific permanent grassland to border irrigation regulated by tensiometers. *Europ. J. Agron.*. In Press.

- Meynard J-M., Aggeri A.F., Coulon J.B., Habib R., Tillon J.P., 2006. Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants - rapport du groupe de travail. INRA. 71p.
- Morlon P., 2005. La dimension spatiale des pratiques agricoles : une approche agronomique. In : « Agricultures et territoires ». Laurent C., Thinon P (Eds.). Paris. Hermès.302p.
- Papy F., Attonaty J.M., Laporte C., L.G. Soler., 1988. Work organization simulation as a basis for farm management advice. Agric. Syst. 27, 295-314.
- Papy F., Martin P., Bruno J.F., 1996. Comment réduire les risques d'érosion par les pratiques agricoles? Sadapter aux systèmes érosifs et au contexte économique. Paper presented at the Sécheresse, pollution, inondation, érosion: que fait la recherche?, Forum - 29th september - 1st october Poitiers.
- Papy F., 2000. Farm models and decision support: a summary review. In : "Research on agricultural systems: accomplishment, perspectives and issues". C. E. W. Colin J.P. (Eds.), Nova Science Pub.
- Papy F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. In : « Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision ». T. G. Malezieux E., Jaeger M. (Eds.), Montpellier, Paris, Coed Cirad-INRA. 447p.
- Papy F., Baudry J., 2005. Le système de culture: différents niveaux d'organisation territoriale à distinguer et articuler. Paper presented at the Les entretiens du Pradel : Agronomes et territoires. 12-13 septembre 2002.
- Rapidel B., Defèche C., Traoré B., Lançon J., Wery J., 2006. In-field development of a conceptual crop functioning and management model: a case study on cotton in southern Mali. Europ. J. Agron., 24, 304-315.
- Sebillotte M., Soler L.G., 1990. Les processus de decision des agriculteurs – I Acquis et questions vives. In Brossier J. et al., (Eds.). Modélisation systémique et systèmes agraires. Paris. Inra. 88-102.

CHAPITRE VI

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

VI. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Nous nous sommes fixés quatre objectifs scientifiques (Chapitre I) susceptibles d'apporter une contribution à l'ensemble des questions actuelles de recherche (Annexe 7).

Les contributions de ce travail concernent finalement les thématiques de la gestion de l'eau, des systèmes de culture prairiaux plurispécifiques, des systèmes de culture prairiaux irrigués et de l'utilisation de la modélisation pour la conception de systèmes de culture innovants dans le cadre du système de culture étudié :

(i) *l'étude des systèmes prairiaux en conditions irriguées*. La façon originale d'aborder la prairie comme un agro-système mais aussi de temps à autre comme un hydro-système, nous a permis de donner un poids égal à la plante et à l'eau. Le sol a joué le rôle de compartiment de transfert pour l'eau et de signal de stress hydrique pour la plante. L'approche systémique à la parcelle basée sur les états et les flux a permis de structurer aussi bien la démarche d'expérimentation que la démarche de modélisation numérique, tout en ouvrant des pistes d'expérimentation pour le pilotage du système sur la base d'indicateurs d'état du compartiment sol.

(ii) *l'étude de la plurispécificité dans les systèmes de culture et notamment dans les systèmes prairiaux*. Nous avons associé deux approches dans cette étude. Lors des expérimentations, l'analyse de la dynamique de cette plurispécificité en fonction des apports d'eau se devait d'être détaillée. Nous avons donc privilégié une description agro-écologique de la prairie qui nous a permis de quantifier les évolutions de composition floristique en fonction de déficits hydriques modérés et de courte durée. On trouve peu de références sur ce sujet dans la littérature et elles portent sur les effets de déficits hydriques importants et prolongés. La phase de modélisation par la suite a nécessité de simplifier le système (Figure I.1) pour pouvoir le représenter sous forme numérique. La plupart des modèles de culture ne prennent pas en compte la plurispécificité des prairies (exemple STICS prairie). Lorsqu'elle est prise en compte les études restent sur des approches trop complexes (Corson et al., 2006) pour être utilisées dans un couplage avec d'autres modèles comme notre modèle d'irrigation ou d'exploitation. Nous n'avons donc gardé qu'un seul aspect de cette plurispécificité : l'effet de la plurispécificité sur les potentiels de rendement,

(iii) *l'amélioration de l'Efficiency d'Application de l'eau (AE) et de l'Efficiency d'Utilisation de l'Eau (WUE)*. Notre étude menée sur le pilotage tensiométrique n'a pas permis d'économies d'eau à l'échelle de la parcelle par rapport au système traditionnel, contrairement

aux résultats obtenus en général sur les autres cultures. Nos résultats nourrissent cependant les réflexions sur l'application de la Tensiométrie pour réguler les déficits hydriques et limiter les pertes d'eau dans la recherche d'un compromis entre rendement, quantité d'eau utilisée et quantité pour la recharge de la nappe.

(iv) *la réflexion sur la modélisation et la conception de systèmes de culture assistée par des modèles et la formalisation du système décisionnel*. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de modèle représentant la gestion de l'irrigation gravitaire. Cette étude a montré que les décisions et interactions sont complexes dans le cadre de l'irrigation gravitaire ce qui implique de décrire spatialement et dans le détail la gestion de l'eau et ses interactions avec les coupes pour le foin à l'échelle de l'exploitation.

Ce dernier chapitre VI est organisé en quatre parties thématiques. Dans les trois premières parties, les principaux résultats sont repris puis discutés et une ouverture est proposée quand au thème abordé. Dans la quatrième partie, sont abordées les perspectives de construction d'un Outil d'Aide à la Décision à partir de ce travail.

VI.1. Etude et modélisation du système biophysique à l'échelle parcellaire

VI.1.1. Le système de culture prairial irrigué et le déficit hydrique modéré

L'étude apporte des éléments de réflexion sur la problématique de la réaction des systèmes prairiaux à des déficits hydriques. Nous avons mis en place une démarche complète et équilibrée qui n'a pas privilégié l'étude d'un des composants (plante, sol, eau). L'intérêt de cette étude réside aussi dans l'association de l'approche écologique de la composition floristique en lien avec la recherche d'indicateurs du statut hydrique du sol et de seuils de stress hydrique. Nous avons (i) observé une forte sensibilité de la prairie à un déficit hydrique modéré et (ii) validé deux indicateurs de pilotage de l'irrigation : FTSW et le potentiel hydrique du sol dans la zone racinaire.

(i) Concernant la sensibilité de la prairie au déficit hydrique modéré, peu d'études ont été conduites sur des prairies permanentes dans des conditions irriguées, la plupart étant conduites dans des conditions de sécheresses estivales (Volaire et Lelièvre, 2001). Ce travail

contribue donc à mieux connaître le fonctionnement des prairies irriguées et permet de préciser les évolutions en biomasse de chaque espèce en déficit hydrique modéré mais fréquent, les études en conditions de déficit hydrique fort (sécheresse) permettant plutôt de qualifier les évolutions du nombre d'espèces prairiales à long terme. Cependant, cette forte sensibilité de la prairie a été peu étudiée pour les espèces prairiales (Belaygue et al., 1996 ; Volaire et Lelièvre, 2001) et pour d'autres cultures comme la vigne (Pellegrino et al., 2006) à ce niveau de déficit hydrique. La baisse de la disponibilité en azote liée à l'augmentation du déficit hydrique dans un milieu peu fertilisé (Lemaire et Denoix, 1987; Kelly et al., 2003) pourrait expliquer la réponse de la prairie observée. Quelques évaluations de l'Indice de Nutrition Azotée (INN) sur les échantillons de mélange ont montré que l'INN était systématiquement en dessous de 1 indiquant des déficits en azote notamment lors des dessèchements. Il serait souhaitable de continuer à creuser cette question d'autant que la notion d'Indice de Nutrition azoté en peuplement plurispécifique demande à être discutée car les variations de composition floristique en fonction du déficit hydrique rendent délicate l'obtention d'une courbe de référence.

(ii) Deux indicateurs de pilotage de l'irrigation basés sur la mesure du statut hydrique du sol perçu par la plante (Wery et al., 2005) ont été validés : la tension (valeur absolue du potentiel matriciel) dans la zone racinaire et le Fraction maximum d'Eau du sol Transpirable par la plante FTSW. La tension, mesurée à plusieurs profondeurs, renseigne à la fois sur le niveau de déficit hydrique du sol et sur les flux dans et sous la zone racinaire. La FTSW donne une valeur synthétique du déficit hydrique perçu par la plante compte tenu de la réserve utile du sol, de la distribution de l'enracinement et de la capacité de la plante à extraire l'eau liée à son caractère isohydrique (vigne, Pellegrino et al., 2004 ; ou le maïs, Cabelguenne et Debaeke, 1998) ou anisohydrique (le coton, Lacape et al., 1998 ou le tournesol, Cabelguenne et Debaeke, 1998). Nos résultats suggèrent sur l'irrigation d'une prairie plurispécifique peut être pilotée par des indicateurs développés sur des cultures monospécifiques (Wery, 2005) bien que la réaction de chaque espèce au déficit hydrique puisse-être différente. Ceci suggère que les prairies de Crau fonctionnent sur le principe de la 'belowground dominance' (Burke et al., 1998) où les relations de dominance entre espèces prairiales sont liées à un seul facteur limitant, l'eau. La 'belowground dominance' se traduit par une colonisation uniforme de la couche de sol par les racines (Burke et al., 1998). Seule la différence de capacité de prélèvement de l'eau par les racines (Lelièvre et Desplobins, 1994) va différencier les espèces

entre elles, mais la densité racinaire est telle que l'association des espèces se comporte comme un couvert monospécifique pour la perception du dessèchement du sol. Du point de vue du déclenchement de l'irrigation, la prairie peut donc être considérée comme une culture monospécifique avec un enracinement uniforme.

VI.1.2. L'étude de systèmes plurispécifiques

Dans cette thèse, la notion de plurispécificité était importante pour trois raisons : (i) toutes les espèces n'ont pas le même potentiel de croissance, l'ensemble des espèces présentes sont donc à l'origine d'un certain potentiel de croissance ; (ii) toutes les espèces n'ont pas la même valeur nutritionnelle ce qui influe sur la qualité du foin (Figure II.1) ; (iii) la présence de plusieurs espèces avec un fonctionnement différent crée de l'hétérogénéité. Confrontés à la plurispécificité lors de l'étude des prairies et de la modélisation de cette plurispécificité, nous avons adopté deux démarches complémentaires :

(i) dans le cadre de l'acquisition de connaissances sur le système de culture, une approche écologique a été utilisée. L'étude de la plurispécificité fait appel à des effets de concurrence pour les ressources et à des stratégies de développement d'espèces dans un milieu donné (Lelièvre et Desplobins, 1994 ; Burke et al., 1998 ; Liancourt et al., 2005). En peuplement plurispécifique, une espèce se développe souvent au détriment d'une autre espèce. Une composition floristique est alors la résultante de divers comportements d'espèces dans un environnement. Nous avons ainsi caractérisé la prairie en termes de composition floristique (en biomasse mais pas en nombre d'individus) et de valeur pastorale comme critère de qualité des prairies (Delpech, 1960 ; Daget et Poissonet, 1971). Nous avons montré que la composition floristique des prairies étudiées était très sensible à des déficits hydriques modérés provoqués par des changements de la fréquence d'irrigation. Des comportements différenciés entre espèces ont été observés, les espèces de la catégorie « diverses » à faible potentiel nutritionnel et de rendement, sont favorisées par des déficits hydriques modérés au détriment des graminées. Les études précédentes cherchaient à classer les espèces par rapport à leur sensibilité à de fortes humidités du sol (Klapp, 1965 cité par Pervanchon, 2004) ou de forts dessèchements (Volaire et Lelièvre, 1992). Dans notre approche nous avons privilégié l'étude de la réaction globale du mélange à des déficits hydriques modérés plus réalistes par rapport aux conditions de production. Nos résultats sont donc difficiles à interpréter à partir

des connaissances actuelles sur le comportement de chaque espèce. Des études sur le plus long terme permettraient de conclure sur l'évolution de la composition floristique en nombre d'individus plutôt qu'en biomasse.

(ii) L'approche écologique est lourde à mettre en œuvre (Daget et Poissonnet, 1971) surtout lorsqu'on veut modéliser la dynamique du système. Lors de la modélisation de la culture, une démarche plus opérationnelle a été adoptée pour adapter un modèle de culture (Adam et al., 2007) basé sur l'approche des traits fonctionnels (Lavorel et al., 1997). Les prairies de la plaine de Crau combinent une dizaine d'espèces très variées dont la proportion évolue en cours de saison. Le potentiel de rendement aux différentes coupes qui est la résultante des traits fonctionnels du mélange, varie en fonction du ratio entre toutes ces

l'hétérogénéité dans le sens d'avancement de l'eau. Nous n'avons pas mis en évidence d'hétérogénéité spatialement structurée dans les parcelles étudiées. Cependant on note que les graminées sont plus présentes (et les rendements supérieurs) en bas de parcelle. La notion de stratégie d'espèce englobe aussi la stratégie de reproduction des espèces (Burke et al., 1998). Il a été observé que les graines des graminées étaient entraînées vers le bas de la parcelle. Ces observations demanderaient à être étudiées avec une expérimentation spécifique sur cette question.

VI.1.3. Modélisation du système biophysique

Concernant la modélisation de l'eau dans le sol en lien avec le fonctionnement hydrique de la culture, trois aspects méritent d'être discutés :

- (i) La dynamique de l'eau dans le sol a pu être simulée directement à partir d'un réservoir de sol monocouche.
- (ii) L'utilisation du concept de la fraction total d'eau transpirable par la culture FTSW (Lacape et al., 1998) a permis de mieux simuler l'effet du déficit hydrique sur la plante (Lacape et al, 1998; Cabelguenne et Debaeke 1998; Pellegrino et al., 2006).
- (iii) L'évaluation des prélèvements par la culture intègre des effets de vent mais n'est pas basée sur le concept de coefficients culturaux.

La représentation du sol en un réservoir monocouche a bien fonctionné dans notre cas d'étude – avec peu de remontées capillaires et une macroporosité forte. Cette représentation est intéressante dans la perspective d'un couplage (Cros et al., 2003) car elle est plus simple à mettre en œuvre qu'une représentation multicouche ou une approche fonctionnelle comme celle proposée dans le modèle PASTIS (Lafolie, 1991).

L'utilisation du concept de FTSW permet de se rapprocher de la réserve en eau du sol réellement consommable par la culture par rapport à la notion de réserve utile. La relation non linéaire entre le FTSW et la croissance via un indice de stress, a la particularité de mieux faire ressortir la sensibilité de la prairie à un déficit hydrique modéré et court. L'indice de stress augmente en effet plus vite que dans des modèles basés sur le concept Réserve Facilement Utilisable RFU/RU (Mailhol et al., 1997 ; Smith, 1991) quand le déficit hydrique du sol débute après une irrigation.

Nous avons aussi choisi de ne pas simuler les prélèvements par la culture à partir des coefficients culturaux (Smith, 1991 ; Allen et al., 1998). L'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration de référence pondérée par l'état de dessèchement du sol (Cros et al., 2003 ; Adam et al., 2007) et par le vent. L'approximation $ET_0 = ETM$ s'est avérée satisfaisante. Dans le cas de la prairie, les coefficients culturaux sont proches de 1 (Allen et al., 1998), ce qui est une approximation juste avant coupe ou juste après coupe. L'effet du vent est souvent pris en compte à l'échelle des stomates en relation au déficit hydrique (Sato et al., 2006) mais pas à l'échelle du système plante-sol ou même du champ cultivé. La prise en compte d'un effet du vent sur les prélèvements d'eau par la culture à l'échelle du système plante-sol a amélioré les simulations.

Le modèle d'irrigation nous a permis de simuler correctement le déroulement de l'irrigation en particulier la durée d'irrigation dans des sols très caillouteux, peu épais et très filtrants avec des effets macropore non négligeables. Le choix d'une loi d'infiltration à caractère prédictif s'est avéré judicieux pour faciliter le couplage entre le modèle d'irrigation et le modèle de culture (Mailhol, 2003). Ce caractère prédictif nous a permis de caler une relation entre la rugosité et l'indice foliaire. Le couplage a donc été réalisé à partir de deux variables physiques : le déficit en eau du sol et l'indice foliaire, ce qui n'aurait pas été possible à partir d'un modèle tel que SIRMOD (Walker, 2003). Malgré la qualité des simulations, il nous faut toutefois émettre deux réserves :

- (i) les simulations ont donné des résultats très satisfaisants excepté pour les colatures. Des écoulements horizontaux pourraient être récupérés par drainage dans ce fossé de colature. Il serait nécessaire de réaliser quelques observations supplémentaires. Si cette hypothèse se vérifiait, le passage à un modèle plus complet serait nécessaire pour simuler les pertes en colature.
- (ii) nous avons testé le modèle d'irrigation sur des planches rectangulaires et uniformes.

VI.2. Amélioration de l'efficience d'irrigation et économies d'eau

L'efficience de l'eau a été décomposée dans le chapitre I en trois termes : une Efficience de transport et Distribution de l'eau (ED), une Efficience d'Application (AE) et une efficience d'utilisation de l'eau (WUE ou « Water Use Efficiency ») (Tiercelin, 1998) :

(i) L'Efficience de la Distribution n'a pas été étudiée dans cette thèse. Cependant, l'étude de l'ED est importante pour l'ensemble de la réflexion et la poursuite de ce travail vers des résultats plus opérationnels. Les pertes d'eau dans les canaux de transport sont variables d'un revêtement à l'autre notamment entre un canal en terre juste nettoyé et un revêtement imperméable où l'infiltration est nulle.

(ii) Nous n'avons pas directement répondu à la question de l'amélioration de l'AE. En effet, nous n'avons pas expérimenté de technique alternative limitant les pertes d'eau en colature ou par infiltration. Nous avons opté pour l'adaptation du modèle d'avancement de l'eau qui permet d'y répondre en grande partie (Mailhol et al., 2005) via le calcul d'indicateurs d'efficience de l'irrigation (Burt et al., 1997 ; Clemmens et Burt, 1997) au regard des limites explicitées plus haut.

(iii) Pour WUE, nous avons expérimenté le pilotage tensiométrique à l'échelle de la parcelle (Tron et al., 2000). Cette partie de l'étude a mis en évidence qu'il était difficile d'améliorer le WUE en modifiant les fréquences d'irrigation par pilotage tensiométrique contrairement à de nombreuses études sur le Regulated Deficit Irrigation (Oweis et al., 1998 ; White et Raine, 2004) et sur la tensiométrie (Tron et al., 2000). Les prairies sont très sensibles au déficit hydrique et nos résultats montrent qu'elles sont déjà gérées sous contrainte hydrique en période estivale. Les volumes d'eau apportés aux plantes sont importants mais un retard de quelques jours dans l'irrigation, par exemple pour économiser de l'eau, se traduit alors rapidement par des pertes de rendements. Le WUE diminue dans ce cas, contrairement à la grande majorité des résultats d'études sur le pilotage tensiométrique (Kruger et al., 1999 ; Isbérie et al., 2004 ; Tron et al., 2000). Les résultats ont toutefois montré que des économies d'eau étaient envisageables en irriguant moins souvent en début et fin de saison d'irrigation et plus en milieu de saison en fonction des besoins de la culture. Ceci confirme le choix du pilotage tensiométrique pour cette expérimentation (Tron et al., 2000). L'approche de modélisation associée devrait permettre d'aller plus loin et de tester d'autres scénarios de pilotage visant à rechercher un compromis entre rendement et quantité d'eau utilisée.

L'étude des pratiques à l'échelle du système de culture a apporté des éléments de réflexion supplémentaires. L'enquête réalisée auprès de producteurs de foin de Crau a mis en évidence que ceux-ci adaptent l'ordre d'irrigation en fonction du déficit en eau du sol, du débit d'irrigation et des horaires d'accès à l'eau. Les agriculteurs sont familiers d'un fonctionnement qui vise à optimiser en permanence leur gestion de l'eau malgré les complexes interactions entre les pratiques. Nous avons identifié des contraintes très fortes pour l'irrigation. Il n'y a pas de marges de manœuvre évidentes dans le système actuel excepté pour quelques décisions tactiques ayant peu d'impact sur les économies d'eau. L'expérimentation sur l'optimisation des pratiques comme l'application du pilotage tensiométrique est donc limitée à l'échelle parcellaire, le passage à l'échelle exploitation étant particulièrement délicat du fait de ces contraintes et de la complexité des décisions. La modélisation permet de prendre en compte cette complexité. Cependant, notre approche est limitée par l'absence de modèle à l'échelle du système de culture à la fin de cette thèse. Dans ce travail, nous avons donc initié une démarche de construction d'outil pour l'amélioration de l'efficacité d'irrigation (WUE et AE) qui demande à être complétée.

VI.3. Conception de systèmes de culture assistée par des modèles

VI.3.1. Représenter le fonctionnement de l'exploitation et les décisions de l'agriculteur

Dans ce travail, l'importance de l'organisation spatiale de l'exploitation, le nombre élevé de règles de décision et la concurrence récurrente entre les activités de coupe et d'irrigation ont été conceptualisés. La réussite de cette étape est conditionnée au bon déroulement puis à l'analyse des enquêtes sur la structure et le fonctionnement du système (Capillon, 1993). Le modèle d'action notamment la conceptualisation du fonctionnement en Règles De Décision RDD (Shaffer et Brodahl, 1998 ; Bergez et Garcia, 2004) permet de représenter la gestion de l'irrigation gravitaire avec l'ensemble de ses contraintes. Ce « modèle d'action » est un cadre de représentation des décisions techniques dans une exploitation agricole, largement utilisé par la recherche française, que ce soit pour les grandes cultures (Aubry et al., 1998a), les cultures tropicales comme le coton (Dounias et al., 2002), l'élevage (Girard et Hubert, 1999 ; Cros et al., 2003) ou en irrigation par aspersion (Leroy et al., 1997 ; Bergez et al., 2001). Ce travail est une contribution supplémentaire aux recherches sur la formalisation des décisions

techniques dans les exploitations à partir du concept de modèle d'action et montre une nouvelle fois l'intérêt de ce type d'approche. Dans la suite de cette étude, le modèle conceptuel des décisions à numériser servira de base à la construction d'un modèle de décision qui devrait permettre de générer le système technique.

VI.3.2. Coordonner des méthodes pour concevoir des systèmes de culture

Plusieurs méthodes de travail ont été utilisées pour la réalisation de cette étude : expérimentation, enquête, modélisation. La modélisation permet d'aller plus loin et plus rapidement dans cette étude que l'analyse experte ou l'expérimentation. Etant donnée la complexité des interactions dans le système de culture – entre les pratiques elles-mêmes, entre les pratiques et le sous-système biophysique, et au sein du sous-système biophysique – il est difficile de prévoir les performances d'un système de culture modifié au niveau de la gestion de l'eau (Dore et al., 2006). Les techniques d'enquête et l'expérimentation ont été proposées en parfaite complémentarité avec la modélisation (Meynard et al., 2006). En effet, la modélisation n'aurait pas pu être mise en place sans un minimum de connaissances et de jeux de données sur le système de culture étudié. Ces informations n'étaient pas disponibles dans la bibliographie, il a donc été nécessaire de les collecter sur le terrain. L'expérimentation et les enquêtes ont été adaptées aux objectifs spécifiques de la modélisation, et la modélisation adaptée aux données récoltables.

Cette étude montre la puissance de ces méthodes lorsqu'elles sont associées, l'une n'ayant pu se substituer à l'autre.

Cette approche montre cependant des limites. Elle nécessite de conduire plusieurs protocoles dans le temps de l'étude et ne permet pas de multiplier les répétitions avec un développement statistique plus complet. Ainsi, le nombre de parcelles expérimentales a été limité à deux et le nombre d'enquêtes à sept. Ceci pose la question de la généralisation des résultats et leur domaine de validité dans le territoire d'étude.

VI.3.3. Construire un modèle de simulation du système prairial irrigué par gravité

Nous avons analysé chaque compartiment, sous-système biophysique et sous-système technique, du système de culture dans cette étude (Figure I.1) et cherché à les modéliser. Dans le chapitre IV, nous avons donc proposé un modèle d'irrigation et un modèle de culture. Ces deux modèles sont fonctionnels et paramétrés pour les spécificités du système de culture étudié (plurispécificité, climat méditerranéen, irrigation gravitaire à la planche, prairie). Dans le chapitre V, nous proposons un schéma conceptuel du fonctionnement de la gestion de l'eau dans l'exploitation qui doit maintenant être traduit en modèle numérique.

Ces représentations ont montré chacune leur intérêt pour la compréhension des décisions techniques et du fonctionnement biophysique. Cependant ces modules élémentaires ont été prévus pour composer un modèle de simulation du système de culture. Leur association permet de s'interroger de façon itérative sur les relations entre l'environnement de l'exploitation ou ses ressources, les décisions techniques et les performances biophysiques (Dore et al., 2006). Les modèles de simulation intégrant les aspects biophysiques et décisionnels du système de culture tendent à se développer ces dernières années (Bergez et al., 2001 ; Keating et al., 2003 ; Cros et al., 2003). Cette étude n'est pas terminée, puisque ces modules nécessitent d'être couplés (Ewert et al., 2006). Un premier pas a été réalisé pour le sous-système biophysique avec un premier travail sur le couplage du module d'irrigation et du module de culture. Le choix d'une loi prédictive pour la simulation de l'infiltration a été essentiel pour la réalisation de ce couplage. La structure du module décisionnel étant très différente de celle des modules biophysique, le couplage sera aussi très différent. Cependant la construction du module décisionnel a été concomitante de l'élaboration des modules biophysiques avec l'idée de couplage en arrière plan. L'atout majeur de notre étude est d'étudier l'ensemble des compartiments du système de culture dans un même temps et d'adapter chacun de ces compartiments aux autres.

Cet aspect de couplage rejoint une question peu abordée dans la littérature: les méthodes d'informatisation entraînent-elles une déviation dans les simulations ? Une déviation dans les erreurs de simulation liée à la méthode informatique de couplage ne peut en effet être exclue.

Le travail restant à accomplir est encore riche mais relève plus du développement informatique que de la recherche en agronomie.

L'absence d'analyse des critères d'évaluation de systèmes de culture prairiaux est une limite à ce travail. Certains auteurs ont abordé la question sous l'angle de la biodiversité (Pervanchon, 2004), d'un point de vue de la gestion de l'eau et de l'agronomie, ces critères doivent être complétés même s'il en existe déjà dans la littérature (Loyce et Wery, 2006). La définition de critères d'évaluation est une phase essentielle de la construction d'un modèle pour apprécier la valeur prédictive de ce modèle en lien avec son utilisation.

VI.4. Vers la construction d'un outil d'aide à la décision pour concevoir des systèmes de culture

Cette étude est née d'un objectif opérationnel sur la gestion de l'eau puis a été déclinée en quatre objectifs scientifiques. La démarche que nous avons initiée implique le passage d'un outil de simulation du système de culture à un Outil d'Aide à la Décision (OAD ou « Decision Support System ») en matière de gestion de l'eau en lien avec l'environnement et la production, cherchant des solutions de compromis entre production de foin, économies d'eau et recharge de la nappe (Cox, 1996 ; Bergez et al., 2002 ; Carberry et al., 2002). Avec cet outil il s'agit de répondre aux questions de gestion de l'eau qui ont été posées : comment économiser de l'eau en amont, comment concevoir de nouveaux systèmes de culture plus efficaces en matière de gestion de l'eau. Cette vision à moyen terme de l'utilisation des résultats de cette thèse a conditionné certaines questions et choix méthodologiques dans cette étude même si le modèle de simulation reste pour l'instant un support de recherche.

Des objectifs précis ont été définis pour cet outil. Il vise à :

- Evaluer l'impact d'une modification des pratiques de gestion intégrée de l'irrigation en termes de décisions stratégiques (choix de la surface irriguée dans l'exploitation, pentes des parcelles, sens d'arrosage et nombre de planches par parcelle, revêtement des canaux d'irrigation, passage à l'automatisation,...) et de décisions tactiques (pilotage de l'irrigation, modification des ordres d'arrosage, réactions aux restrictions, ...),

- analyser l'impact de différents scénarios de distribution de la ressource (situations de crise, baisse des volumes d'eau attribués, modifications des calendriers de distributions d'eau).

Dans l'état actuel du travail, certains scénarios peuvent être testés à l'échelle de la parcelle comme l'impact d'un changement du sens d'irrigation, les modifications de la pente d'une planche ou encore les modifications de la fréquence d'irrigation. Les modifications peuvent être évaluées sur la base des rendements et des performances hydrauliques – eau consommée en entrée de parcelle, uniformité d'arrosage, eau en colature et eau drainée vers la nappe.

Cet outil est destiné à deux types d'utilisateurs : des professionnels de l'agriculture et de l'irrigation de la plaine de Crau et des institutionnels représentant l'état et la société. Les attentes des professionnels de Crau se centrent sur la défense de l'agriculture et de l'irrigation en rapport avec l'environnement et les externalités de l'irrigation gravitaire. Les attentes des institutionnels concernent la recherche de techniques d'irrigation intégrées du territoire jusqu'à la parcelle qui permettent d'économiser de l'eau tout en assurant la recharge de la nappe et le maintien de l'agriculture. Une approche participative avec les utilisateurs (Carberry et al., 2002) permettront de définir les critères d'évaluation des systèmes de culture qui seront susceptibles d'être testés et d'affiner le cahier des charges pour la construction, le test et l'utilisation de l'outil d'aide à la décision.

Nous avons contribué à répondre dans cette thèse aux professionnels de la Crau, conformément aux objectifs de cette thèse CIFRE¹³ :

- les premiers résultats d'expérimentation ont fourni des références intéressantes sur l'irrigation des prairies, en lien avec leur forte sensibilité à des changements de la fréquence d'irrigation,
- la modélisation à la parcelle permet d'ores et déjà de tester à cette échelle l'effet de modifications du sens d'irrigation, l'effet d'un changement de débit, de pente, et ce dans des contextes climatiques variés,
- le travail d'enquête et le schéma conceptuel apportent un regard nouveau sur le fonctionnement des exploitations agricoles et leur durabilité,
- un grand pas vers la construction d'un Outil d'Aide à la Décision a été réalisé.

¹³ CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la Recherche

La prochaine étape est maintenant d'impliquer plus activement les professionnels dans la construction de cet outil pour une appropriation plus efficace.

Cet outil est basé principalement sur les résultats de cette recherche. Plusieurs aspects sont donc absents de cet outil :

- (i) soit volontairement exclus car complexes à modéliser : qualité du foin, l'effet de l'irrigation sur la végétation de bordure des canaux, la qualité de l'eau drainante,
- (ii) soit volontairement exclus car peu importants : la fertilisation des prairies, les pratiques d'entretien des canaux et des haies,
- (iii) soit prévus mais nécessitant des recherches complémentaires : transferts de l'eau dans les canaux,

L'évaluation de cet outil mériterait aussi des recherches supplémentaires tant en termes de domaine de validité – de gamme d'utilisation – qu'en termes de qualité prédictive en rapport avec la précision des résultats attendus (Rykiel, 1996 ; Sinclair et Séligman, 2000).

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam M., M. Duru, P. Cruz, C. Ducourtieux, P. Ansquer, J.P. Theau, C. Jouany, & J. Viegas. (2007). Modelling grassland aboveground biomass for a large range of plant community types. *European Journal of Agronomy*. Submitted.
- Al-Faraj A., G.E. Meyer, & G.L. Horst. (2001). A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making - a traditional method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31, 107-124.
- Allain S. (1998). IRRI-MIEUX: gestion collective d'une ressource en eau - des droits à l'eau à la gestion collective de l'eau - Etude de cas Tome I - La nappe de Crau. 28p.
- Andrieux P. (1981). Etude des sols du Domaine du Merle - Méthodes et premiers résultats. Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier. 46p.
- Ansquer P., J.P. Theau, P. Cruz, J. Viegas, & R. Al Haj Khaled. (2004). Caractérisation de la diversité fonctionnelle des prairies naturelles. *Fourrages*, 179, 353-368.
- Attonaty J.M., M.H. Chatelin, & J. Mousset. (1993). A Decision Support System based on farmer's knowledge to assist him in decision-making about work organization and long term evolution. International seminar of CIGR Models Computer programmes and expert systems for agricultural mechanization, 1-2 october, Florenza, Italy, 8-22.
- Aubry C., A. Biarnes, F. Maxime, & F. Papy. (1998a). Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture. *Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*. 31, 25-43.
- Aubry C., F. Papy, & A. Capillon. (1998b). Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems*, 56(1), 45-65.
- Aubry C., J-M. Paillat, & F. Guerrin. (2006). A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island. *Agricultural Systems*, 88, 294-315.
- Balland P., P. Huet, E. Lafont, J.P. Leteurtrois, & P. Pierron. (2002). Rapport sur la Durance : Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la Durance - Contribution à un Plan Durance. Affaire IGE/01/025. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ministère délégué à l'Industrie, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et des Affaires Rurales, Ministère de l'Equipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer. Paris. 98p.
- Baudry J., & F. Papy. (2001). The role of landscape heterogeneity in the sustainability of cropping systems. In: Nösberger J., Struik P.C. (Eds), *Crop Science*, Oxon, Cabi Publishing, 243-259.
- Belaygue C., J. Wery, A.C. Cowan, & F. Tardieu. (1996). Contribution of leaf expansion, rate of leaf appearance and stolon branching to growth of plant leaf area under water deficit in white clover. *Crop Science*, 36, 1240-1246.
- Bergez J-E, P. Debaeke, J-M. Deunier, B. Lacroix, D. Leenhardt, P. Leroy, & D. Wallach. (2001). MODERATO: An object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological modelling*, 137, 43-60.
- Bergez J-E., J-M. Deunier, B. Lacroix, P. Leroy, & D. Wallach. (2002). Improving irrigation schedules by using a biophysical and decisional model. *European Journal of Agronomy*, 16, 123-135.
- Bergez J-E, F. Garcia, & L. Lapasse. (2004). A hierarchical partitioning method for optimizing irrigation strategies. *Agricultural Systems*, 80, 235-253.

- Bergez J-E., F. Garcia. & D. Wallach. (2006). Representing and optimizing management decisions with crop models. In: "Working with Dynamic Crop Models: evaluating, analyzing, parameterization and applications. D. Wallach, D. Makowski, J.W. Jones (Eds). Elsevier, Amsterdam (NL). 257-279
- Bissuel-Belaygue C., A.A. Cowan, A.H. Marshall, & J. Wery. (2002). Reproductive Development of White Clover (*Trifolium repens* L.) is not impaired by a moderate water deficit that reduces vegetative growth: I. Inflorescence, floret and ovule production. *Crop Sciences*, 42, 416-414.
- Bissuel-Belaygue C., A.A. Cowan, A.H. Marshall, & J. Wery, J. (2002). Reproductive development of White Clover (*Trifolium repens* L.) is not impaired by a moderate water deficit that reduces vegetative growth: II. fertilization efficiency and seed set. *Crop Sciences*, 42, 414-422.
- Boutin J., & G. Cheylan. (2004). Natural areas in the Crau. *International Journal of Mediterranean Ecology*, 30(1), Special issue.
- Bretez M. (1983). Etude de la qualité du foin de Crau. Mémoire d'ingénieur. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, , Montpellier. 159p.
- Brisson N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Dürr, B. Nicoulaud, G. Richard, N. Beaudouin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J..M. Meynard, & R. Delecolle. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance - I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson N., F. Huard, A.I. Gruaux, C. Lebas, P. Debaeke, G. Lemaire, & B. Itier. (2006). Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique: Unité AGROCLIM - INRA - Ministère de l'Agriculture et de la pêche. 31p.
- Brisson N., Wery J. & K. Boote. (2006b). Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: "Working with Dynamic Crop Models: evaluating, analyzing, parameterization and applications. D. Wallach, D. Makowski, J.W. Jones (Eds). Elsevier, Amsterdam (NL). 257-279
- Brisson N., & Wery, J. (2002). Introduction aux modèles de culture. Ecole Chercheur 'Modélisation'. Le Croisic. France. 14-19 octobre 2002. 17p.
- Burke I.C., W.K. Lauenroth, M.A. Vinton, P.B. Hook, R.H. Kelly, H.E. Epstein, M.R. Aguiar, M.D. Robles, M.O. Aguilera, K.L. Murphy, & R.A. Gill. (1998). Plant-soil interactions in temperate grasslands. *Biogeochemistry*, 42, 121-143.
- Burt C.M., A.J. Clemmens, T.S. Strelkoff, K.H. Solomon, R.D. Bliesner, L.A. Hardy, T.A. Howell, & D.E. Eisenhauer. (1997). Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423-442.
- Cabelguenne M., & P. Debaeke. (1998). Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soybean, sorghum and wheat. *Plant and Soil*, 202 175-192.
- Caldwell M. M. (1970). Plant gas exchange at high wind speeds. *Plant Physiology*, 46, 535-537.
- Capillon A. (1993). Typologie des exploitations agricoles. Contribution à l'étude régionale des problèmes techniques. Th.D – Institut National Agronomique de Paris-Grignon - Paris. Tomes I et II, 48 et 301p.
- Capillon A., & J. Caneill. (1987). Du champ cultivé aux unités de production : un itinéraire obligé pour l'agronome. *Cahier des Sciences Humaines*, 23, 409-420.
- Carberry P.S., Z. Hochman, R.L. McCown, N.P. Dalgliesh, M.A. Foale, P.L. Poulton, J.N.G. Hargreaves, D.M.G. Hargreaves, S. Cawthray, N. Hillcoat, & N.J. Robertson. (2002).

- The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems*, 74, 141-177.
- Celette F., J. Wery, E. Chantelot, J. Celette, & C. Gary. (2005). Belowground interactions in a Vine (*Vitis vinifera* L.)-tall Fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) intercropping system: Water Relations and Growth. *Plant and Soil*, 276, 205-217.
- Clemmens A.J. (2002). Measuring and improving irrigation performance at the field level *Transaction of ASAE*. 22(8), 89-96.
- Chatelin M-H., C. Aubry, J.C. Poussin, J-M. Meynard, J. Masse, N. Vertjux, P. Gate & X. Le Bris. (2005). Decibl  , a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems*. 83(1), 77-99.
- Clemmens A.J., & C.M. Burt. (1997). Accuracy of irrigation efficiency estimates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 443-453.
- Comité du foin de Crau. (2003). Une terre de contraste    pr  server : La Crau. Comité du foin de Crau. 19p
- Comité du foin de Crau. (2004). Foin de Crau - Quel enjeu? Comité du foin de Crau. 19p.
- Corson M.S., R.H. Skinner, & C.A. Rotz. (2006). Modification of the SPUR rangeland model to simulate species composition and pasture in humid temperate regions. *Agricultural systems*, 87, 169-191.
- Cox P.G. (1996). Some issues in the design of agricultural Decision Support Systems. *Agricultural Sytems*, 52(2-3), 355-381.
- Cros M.J., M. Duru, F. Garcia, & R. Martin-Clouaire. (2003). A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie*, 23, 105-122.
- Cuny H., Wery J., & Gaufres F. (1998). A simple indicator for diagnosing leaching risk below the root zone using Tensionic tensiometers. *Agronomie*, 18, 521-535.
- DaCosta M., & B. Huang. (2006). Deficit irrigation effects on water use characteristics of Bentgrass species. *Crop Science*, 46, 1779-1786.
- Daget Ph., & P. Poissonet. (1971). Une méthode d'analyse phyto  cologique des prairies. Critères d'applications. *Annales d'agronomie*, 22(1), 5-41.
- Daudet F.A., X. Le Roux, H. Sinoquet, & B. Adam. (1999). Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97, 171-185.
- Davies W.J., & W. Hartung. (2004). Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity?. *In*: New directions for a diverse planet - Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, 26 September – 1 October 2004, Brisbane, Australia..
- Debaeke P., J-M. Nolot, & D. Raffaillac. (2006). A rule-based method for the development of a crop management systems applied to grain sorghum in south-western France. *Agricultural Systems*, 90, 180-201.
- Delpech R. (1960). Critères de jugement de la valeur agronomique des prairies. *Fourrages*, 4, 83-98.
- Deng X.P., L. Shan, H. Zhang, & N.C. Turner. (2004). Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of china. *In*: New directions for a diverse planet - Proceedings for the 4th International Crop Science Congress, 26 September – 1 October 2004, Brisbane, Australia.
- Diaz S., & M. Cabido. (1997). Plant functional types and ecosystem functions in relation to global change. *Journal of Vegetation Science*, 8, 463-474.
- Diaz S., S. Lavorel, S. McIntyre, V. Falczuk, F. Casanove, D.G. Milchunas, C. Skarpe, G. Rusch, M. Sternberg, I. Noy-Meir, J. Landsberg, w. Zhang, H. Clark, & B.D.

- Campbell. (2007). Plant traits responses to grazing - a global synthesis. *Global Change Biology*, 13, 313-341.
- Djouabi F. (2004). Diagnostic territorial et environnemental des périmètres irrigués gérés par les associations syndicales de la plaine de Crau - Contribution à l'adaptation d'un modèle de gestion et d'allocation de la ressource en eau : IRMA. Master développement rural et projet, IAMM, Montpellier, 273p.
- Dore T., M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, & J. Roger-Estrade. (2006). *L'agronomie aujourd'hui*. Quae Editions. Paris. 367p.
- Dounias I., C Aubry, & A. Capillon. (2002). Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agricultural Systems*, 73, 233-260.
- Duru M., & B. Hubert. (2003). Management of grazing systems: from decision and biophysical models to principles for action. *Agronomie*, 23, 689-703.
- Duru M., P. Cruz, & D. Magda. (2004). Using plant traits to compare sward structure and composition of grass species across environmental gradients. *Applied Vegetation Science*, 7, 11-18.
- Esquirol P., & P. Lopez. (1999). *L'ordonnancement*. Economica (Eds.). Paris. 133p.
- Ewert F., H. Van Keulen, M Van Ittersum, K. Giller, P. Leffelaar, & R. Roetter. (2006). Multi-scale analysis and modelling of natural resource management options. In: *Proceedings of the IEMSs Third biennial Meeting "Summit on Environmental Modelling and Software"*. International Environmental Modelling and Software Society. Burlington, Vermont, USA, July 2006.
- Gastal F., G. Belanger, & G. Lemaire. (1992). A model of the leaf extension rate of tall fescue in response to nitrogen and temperature. *Annals of Botany*, 70(5), 437-442.
- Gay F., (2002). Elaboration d'une méthode d'évaluation des risques de pollution nitrique et de pertes de rendement en parcelles agricoles: application à la gestion des irrigations en culture de laitues sous abri froid. Th.D Biologie intégrale. Développement et adaptation des plantes. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, Montpellier. 238p.
- Girard N., & B. Hubert. (1999). Modelling expert knowledge with knowledge-based systems to design decision aids. The example of a knowledge-based model on grazing management. *Agricultural Systems*, 59, 123-144.
- Girard N., S. Bellon, B. Hubert, S. Lardon, C.H. Moulin, & P.L. Osty. (2001). Categorising combinations of farmer's land use practices: an approach based on examples of sheep farms in the south of France. *Agronomie*, 21, 435-459.
- Girona J., M. Mata, A. Arbonès, J. Rufat, & J. Marsal. (2005). Peach tree response to single and combined deficit irrigation regimes in deep soil. *Agricultural Water Management*, 72, 97-108.
- Gleyses G.; Perrault A.; Terreaux J.P.(2004a). Annexe A6 : Irrigation et pollution des eaux. In : *Eléments quantitatifs concernant l'irrigation dans la zone d'influence principale du projet de réservoir de Charlas*. Cemagref, Irrigation, 178-192.
- Gleyses G., & T. Rieu. (2004b). *L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolutions*. Cemagref Editions. 60p.
- Grieu P., D.W. Lucero, R. Ardiani, & J.R. Ehleringer. (2001). The mean depth of soil water uptake by two temperate grassland species over time subjected to mild soil water deficit and competitive association. *Plant and Soil*, 230, 197-209.
- Han D., O'Kiely, P., & Da-Wen Sun. (2003). Application of Water-stress Models to estimate the herbage dry matter yield of a permanent grassland pasture sward regrowth. *Biosystems Engineering*, 84(1), 101-111.

- Herrero M. (1997). Modelling dairy grazing systems an integrated approach. Th.D. University of Edinburgh, Edinburgh.
- Hugues P., I. Denoy, & M. Ferret. (1952). Etude d'une prairie de fauche irriguée en Crau. *Annales de l'INRA*, 539-643.
- Isberie C. (1992). Contribution du sol à l'alimentation hydrique d'un verger de cerisiers micro-irrigué selon pilotage tensiométrique. University Montpellier II - sciences et techniques du Languedoc, Aix en Provence. 415p + Annexes.
- Isberie C., A. Bensaoud, E. Lesage, & C. Lohou. (2004). Tensiometric measurements: a tool to analyse root growth and to schedule irrigation of landscape trees. *Acta Horticulturae*, 664, 325-332.
- Jacobsen B.H. (1994). Farmer's decision making behaviour: empirical findings from Denmark. *In*: Jacobsen B.H., D.E. Pedersen, J. Christensen, S. Rasmussen (Eds.). *Farmer's decision making: a descriptive approach. Proceeding from the 38th seminar of EAAE, may 1994, Copenhagen, Denmark.*
- Jouven M., P. Carrere, & R. Baumont. (2006a). Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. I. Model description. *Grass and forage science*, 61, 112-124.
- Jouven M., P. Carrere, & R. Baumont. (2006b). Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. II. Model evaluation. *Grass and forage science*, 61, 125-133.
- Kallarackal J., & C.K. Somen. (1997). An ecophysiological evaluation of the suitability of *Eucalyptus grandis* for planting in the tropics. *Forest Ecology and Management*, 95, 53-61.
- Kassioumi M., D. Veresoglou, & V. Noitsakis. (2002). Drought resistance and flowering phenology of five perennial grass species. The Multi-function grasslands: quality forages, animal products and landscapes. *In*: *Proceedings of the 19th General Meeting of the European Grassland Federation, 27-30 may 2002. La Rochelle, France.*
- Katapodes N.D. , & T. Strelkoff. (1977). Hydrodynamics of Border irrigation - Complete model. *Journal of Irrigation and Drainage* 113(309-324).
- Keating B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson, D. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn, & C.J. Smith. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18, 267-288.
- Keating B.A., & R.L. McCown. (2001). Advances in farming systems analysis and intervention. *Agricultural Systems*, 70, 555-579.
- Kelly K.B., C.R. Stockdale, & Mason, W. K. (2003). The productivity of irrigated legumes in Northern Victoria. 1. Effect of irrigation interval. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45(12), 1567-1576.
- Kruger E., G. Schmidt, & U. Bruckner. (1999). Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Scientia Horticulturae*, 81, 409-424.
- Labbe F., P. Ruelle, P. Garin, & P. Leroy. (2000). Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy*, 12, 55-67.
- Labbé F., P. Ruelle, P. Garin, P. Leroy, & J.C Mailhol. (1997). Pratique d'irrigation au niveau de l'exploitation agricole et analyse de la gestion de l'eau en situation de manque:

- étude de cas en Charente. In: Proceeding of the International Commission on Irrigation and Drainage - regional conference. Oxford (UK).
- Lacape M.J., J. Wery, & D.J.M. Annerose. (1998). Relationships between plant and soil water status in five field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field Crops Research*, 57, 29-43.
- Ladki M., N. Faysse, D. Vega, R. Peñarrieta, & M. Béchard. (2006). L'urbanisation des périmètres irrigués gravitaire : problèmes, opportunités et choix difficiles. Leçons tirées des expériences française et bolivienne. In: « L'avenir de l'agriculture irriguée en Méditerranée. Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau », 3ème séminaire international WADEMED, 6-9 novembre 2006. Cahors (France).
- Lafolie F. (1991). Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of the root potential. *Fertilizer Research*, 27, 215-231.
- Lamanda N., E. Malézieux, & P. Martin. (2006). Structure and dynamics of coconut based agroforestry systems in Melanesia: A case-study from the Vanuatu archipelago. In: Tropical homegardens, a time-tested example of sustainable agroforestry". Kumar B.M., P.K.R. Nair (Eds.). Springer editions. 105-120.
- Lançon J., J. Wery, B. Rapidel, M. Angokaye, E. Gérardaux, C. Gaborel, D. Ballo & B. Fadegnon. (2007). An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101-110.
- Lauenroth W.K., J.L. Dodd, & Sims, P. L. (1978). The effects of water and nitrogen induced stresses on plant community structure in a semiarid grassland. *Oecologia*, 36(2), 211-222.
- Lavorel S., S. McIntyre, J. Landsberg, & T.D.A. Forbes. (1997). Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology and Evolution*, 12, 474-478.
- Lecoeur J., & L. Guilioni. (1998). Rate of leaf production in response to soil water deficits in field pea. *Field Crops Research*, 57, 319-328.
- Lelievre F., & G. Desplobins. (1994). Pure lucerne or lucerne in association with grasses for extensive Pastures in dry northern mediterranean areas. In: Management and breeding of perennial lucerne for diversified purposes, European and Near-East Cooperative Resesearch Networks on Pastures and Fodder Crop Production. 4-8 septembre 1997. FAO/Rome. 89-92.
- Lemaire G., & A. Denoix. (1987a). Croissance estivale en matière sèche de peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans l'Ouest de la France. I. Etude en conditions de nutrition azotée et d'alimentation hydrique non limitantes. *Agronomie*, 7(6), 373-380.
- Lemaire G., & A. Denoix. (1987b). Croissance estivale en matière sèche de peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans l'Ouest de la France. II. Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et nutrition azotée. *Agronomie*, 7(6), 381-389.
- Leroy P., J-M. Deumier, C. Jacquin (1997). IRMA: un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation sur l'ensemble de la sole irriguée. *Perspectives Agricoles*. 228, 76-83.
- Levy J.D., M. Bertin, B. Combes, J. Mazodier, & A. Roux. (2005). Irrigation durable - N° CGGREF: 2185: Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité - Conseil général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts. 117p.

- Liancourt P., E. Corcket, & R. Michalet. (2005). Stress tolerance abilities and competitive responses in a watering and fertilization field experiment. *Journal of Vegetation Science*, 16(6), 713-722.
- Loubier S., G. Gleyzes, P. Garin, M. Montginoud, N. Aubry, & F. Christin. (2007). Evaluation de l'efficacité d'une tarification optionnelle de l'eau d'irrigation en Charente. *In* : Congrès SHF, « gestion active des eaux », 12-13 Juin 2007, Paris.
- Loyce C., & J. Wery, 2006. Les outils de l'agronome pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. *In* : »L'Agronomie aujourd'hui« Doré T. , M. Le Bail, P. Martin, B. Ney, J. Roger-Estrade (Eds.). QUAE Editions Paris. 77-95.
- Mace K., P. Morlon, N. Munier-Jolain, & L. Quere. (2007). Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agricultural Systems*, 86(3), 115-142.
- Mailhol J.C. (2003). A predictive form of Horton's equation for simulating furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6), 412-421.
- Mailhol J.C., & JM. Gonzalez. (1993). A furrow irrigation model for real time applications on cracking soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(5), 768-783.
- Mailhol J.C., P. Ruelle, & Z. Popova. (2005). SOFIP: A field-scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. *Irrigation Science*, 24, 37-48.
- Marsal J., M. Mata, A. Arbonès, J. Rufat, & J. Girona. (2002). Regulated Deficit Irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: an evaluation based on vegetative and productive response. *European Journal of Agronomy*, 17, 111-122.
- McCown R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth, & D.M. Freebairn. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural systems*, 50, 255-271.
- McIntyre S., & S. Lavorel. (2007). A conceptual model of land use effects on the structure and function of herbaceous vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119, 11-21.
- Meynard J-M., AF. Aggeri, J.B. Coulon, R. Habib, & J.P. Tillon. (2006). Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants - rapport du groupe de travail. INRA. 71p.
- Mishra S.K., J.V. Tyagi, & V.P. Singh. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological processes*, 17, 2629-2652.
- Monginoud M. (1997). Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation: des instruments de l'information et des acteurs. Th.D. Faculté des sciences économiques. Université de Montpellier I. 312p.
- Moutonnet P., J. Wery, & A. Bossy. (1981). Etude comparative de quatre dispositifs d'irrigation automatique: application au maïs irrigué en localisé. *Agricultural Meteorology*, 24, 275-289.
- Mulia R., & C. Dupraz. (2006). Unusual fine root distributions of two deciduous tree species observed in Southern France: what consequences for root dynamics modelling?. *Plant and Soil*, 281, 71-85.
- Oguntunde P.G., N. Van de Giesen, & H.H.G. Savenije. (2007). Measurement and modelling of a rain-fed citrus orchard under subhumid tropical conditions. *Agricultural Water Management*, 87, 200-208.
- Olioso A., T.N. Carlson, & N. Brisson. (1996). Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 41-59.
- Oweis T., M. Pala, & J. Ryan. (1998). Stabilizing rainfed wheat yields with Supplemental Irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*, 90, 672-681.

- Papy F., J.M. Attonaty, C. Laporte, & L.G. Soler. (1988). Work organization simulation as a basis for farm management advice. *Agricultural Systems*, 27, 295-314.
- Papy F. (1993). Savoir pratique sur les systèmes techniques et aide à la décision (1). Paper presented at the First European Convention on Farming System Research/Extension, Edinburgh.
- Papy F., P. Martin, & J.F. Bruno. (1996). Comment réduire les risques d'érosion par les pratiques agricoles? Sadapter aux systèmes érosifs et au contexte économique. *In*: Sécheresse, pollution, inondation, érosion: que fait la recherche?, Forum - 29th september - 1st October, Poitiers, France.
- Papy F. (2000). Farm models and decision support: a summary review. *In*: "Research on agricultural systems: accomplishment, perspectives and issues". Crawford. E. W., Colin J.P. (Eds), Nova Science Pub. 89-107;
- Papy F. (2001). Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. *In*: « Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision ». T. G. Malezieux E., Jaeger M. (Eds), Montpellier, Paris: Coed Cirad-INRA. 447p.
- Papy F., & J. Baudry. (2005). Le système de culture: différents niveaux d'organisation territoriale à distinguer et articuler. *In*: Les entretiens du Pradel : Agronomes et territoires. 12-13 septembre 2002, Le Pradel. France.
- Pellegrino A., E. Gozé, E. Lebon, & J. Wery. (2006). A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in a network of farmer's fields. *European Journal of Agronomy*, 25, 49-59.
- Pellegrino A., E. Lebon, T. Simonneau, & J. Wery. (2005). Towards a simple indicator of water stress in grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11, 306-315.
- Pellegrino A., E. Lebon, M. Voltz, & J. Wery. (2004). Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil*, 266, 129-142.
- Pervanchon F. (2004). Modélisation de l'effet des pratiques agricoles sur la diversité végétale et la valeur agronomique des prairies permanentes en vue de l'élaboration d'indicateurs agri-environnementaux. Th.D. Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy. 379p.
- Petit V. (1980). Etude et modélisation de la variabilité de l'évapotranspiration réelle – Application au bilan hydrologique de la plaine de Crau., Th.D. Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris. 114p.
- Peyremorte P. (1984). Amélioration de la conduite des arrosages par des agriculteurs qui utilisent des tensiomètres. *In*: Les besoins en eau des cultures, Conférence internationale, INRA Paris, 11-14 septembre. Paris.
- Postel S. (1989). Water for Agriculture: Facing the Limits. *In*: Worldwatch Paper 93 Worldwatch Institute, Washington, DC.
- Rana G., & N. Katerji. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 13, 125-153.
- Rapidel B., C. Defèche, B. Traoré, J. Lançon, & J. Wery. (2006). In-field development of a conceptual crop functioning and management model: a case study on cotton in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 24, 304-315.
- Richards S.J., & A.W. Marsh. (1961). Irrigation based on soil suction measurements. *Soil Science Society of America Proceedings*, 25, 65-69.
- Rinaldi M. (2001). Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 49, 185-196.

- Ritchie J.T., & S. Otter. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. *In*: ARS Wheat yield project. ARS-38. Missouri, Springfield (Eds),. 159-175.
- Ritchies J.T. (1981). Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant and Soil*, 58, 81-96.
- Ruelle P., J.C. Mailhol, & B. Itier. (2004). Assessment of evaporation losses during sprinkler irrigation under dry conditions. *Ingénieries*, 38, 13-20.
- Ruget F., N. Brisson, R. Dlecolle, & F. Faivre. (2002). Sentivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie*, 22, 133-158.
- Rykiel E.J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 90, 229-244.
- Santos A.M., M. Cabelguenne, F.L. Santos, M.R. Oliveira, R.P.Serralheiro, & M.A. Bica. (2000). EPIC-PHASE: a model to explore irrigation strategies. *Journal of agricultural Engeneering Reserach*, 75, 409-416.
- Saos J-L., G. Belaud, F. Charron & P. Le Goulven. (2006). Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau – Rapport final. UMR G-Eau – Supagro. 270p.
- Sato T., O.S. Abdalla, T.Y. Oweis, & Sakuratani, T. (2006). Effect of supplemental irrigation on leaf stomatal conductance of field-grown wheat in Northern Syria. *Agricultural Water Management*, 85, 105-112.
- Saucedo H., C. Fuentes, & M. Zavala. (2005). The Saint-Venant and Richards equation system in surafce irrigation: numerical coupling for the advance phase in border irrigation. *Ingenierie hidraulica en mexico*, 20(2), 109-119.
- Schapendonk A.H.C.M., W. Stol, D.W.G. Van Kraalingen, & B.A.M. Bouman. (1998). LINGRA, a sink/source model to simulate grassland productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 9, 87-100.
- Schippers P., & Joenje, W. (2002). Modelling the effect of fertiliser, mowing, disturbance and width on the biodiversity of plant communities of field boundaries. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, 351-365.
- Sebillote M. (1974). *Agronomie et Agriculture. Essai d'analyse des taches de l'agronome. Cahier de l'ORSTOM série Biologie*, 3(1), 3-25.
- Sebillote M. (1975). Comment aborder et suivre l'introduction dans un système de culture de nouveaux procédés de travail du sol. *Bulletin Technique d'Information*, 302-303, 555-567.
- Sebillote M. (1978). Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Académie d'Agriculture Française*, 11, 906-913.
- Sebillote M. (1990). Système de culture: un concept opératoire pour les agronomes. *In*: “Les systèmes de culture”, Combe L., Picard D. (Eds), INRA. Paris. 165-196.
- Shaffer M.J., & M.K. Brodahl. (1998). Rule-based management for simulation in agricultural decision support systems. *Computers and Electonics in Agriculture*, 21, 135-152.
- Sinclair T.R., & M.M. Ludlow. (1986). Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Australian journal of Plant Physiology*, 13(3), 329-341.
- Sinclair T.R., & N. Seligman. (2000). Criteria for publishing papers on crop modelling. *Field crop research*, 68, 165-172.
- Smeal D., M.K. O'Neill, & R.N. Arnold. (2005). Forage production of cool season pasture grasses as related to irrigation. *Agricultural Water Management*, 76, 224-236.
- Smith M. (1991). CROPWAT: Manual and guidelines. FAO, Rome, Italy.

- Stoate C., N. D. Boatman, R. J. Borralho, C. Rio Carvalho, G. R. de Snoo, & P. Eden. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of environmental management*, 63(4), 337-365.
- Stockle C.O., S. Martin, & G.S. Campbell. (1994). CropSyst, a cropping systems model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, 46, 335-359.
- Takagi K., T. Tsuboya, & H. Takahashi. (1998). Diurnal hystereses of stomatal and bulk surface conductances in relation to vapor pressure deficit in a cool-temperate wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 177-191.
- Tardieu F., & T. Simonneau. (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of experimental Botany*, 49(Special Issue), 419-432.
- Tiercelin J.R. (2007). *Traité d'irrigation*. Lavoisier Tec&Doc Edition. 1011p.
- Tremblay M., & Wallach, D. (2004). Comparison of parameter estimation methods for crop models. *Agronomie*, 24, 351-365.
- Tron G., C. Isberie, & P. Chol. (2000). *La Tensiométrie pour piloter les irrigations*. Educagri Edition . 247p.
- Vile D., B. Shippey, & E. Garnier. (2006). Ecosystem productivity can be predicted from potential relative growth rate and species abundance. *Ecology Letters*, 9, 1061-1067.
- Volaire F., & F. Lelièvre. (1992). Améliorer les ressources fourragères en Corse : Bilan des recherches agronomiques (1985-1991): Station of San Giuliano. 27p.
- Volaire F., & F. Lelièvre. (2001). Drought survival in *Dactylis glomerata* and *Festuca arundinacea* under similar rooting conditions in tubes. *Plant and Soil*, 229, 225-234.
- Walker W.R. (1993). SIRMED, a surface irrigation model. UT 84322-4105. Utah State University Department of Biology and irrigation Engineering, UTAH State University Logan
- Wallace J.S. (2000). Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, 105-119.
- Wallach D., B. Goffinet, J.E. Bergez, P. Debaeke, D. Leenhardt, & J.N. Aubertot. (2001). Parameter estimation for crop models: A new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93(4), 757-766.
- Wallach D., D. Makowski, & J.W. Jones. (2006). Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization and applications. Elsevier Edition. 447p.
- Walliser B. (1977). *Systèmes et modèles: introduction critique à l'analyse de système*. Le Seuil Edition. Paris.
- Wery J. (2005). Differential effects of soil water deficit on the basis plant functions and their significance to analyse crop responses to water deficit in indeterminate plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 1201-1209.
- White S.C., & S.R. Raine. (2004). Identifying the Potential to Apply Deficit Irrigation Strategies in Cotton Using Large Mobile Irrigation Machines. *In: New directions for a diverse planet - Proceedings for the 4th International Crop Science Congress*, 26 September – 1 October 2004, Brisbane, Australia.
- Wilson J.R. (1983). Effects of water stress on herbage quality. *In: Proceedings of the XIV International Grassland Congress*, 15-24 June 1983, Lexington, Kentucky, USA.
- Zatarain F., C. Fuentes, L. Rendon, & M. Vauclin. (2003). Effective soil hydrodynamic properties in border irrigation. *Hydraulic engineering in Mexico. Ingeniera hidraulica en Mexico*, 18(3), 5-15.
- Zerihun D., A. Furman, A.W. Warrick, & C.A. Sanchez. (2005). Coupled surface -subsurface solute transport model for irrigation borders and bassins. I. Model development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(5), 396-406.

VIII. TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

<i>Figure I.1: représentation systémique du système de culture. Le système de culture se décompose en sous-systèmes biophysique et technique, ce dernier étant généré par un système décisionnel l'ensemble étant sous l'influence d'un environnement. Le système de culture est évalué par des critères de performance hydrauliques et agronomiques.</i>	23
<i>Figure II.1 : La plaine de Crau s'étend entre Arles, Fos et Salon de Provence, ces limites étant très voisines de celles de la nappe superficielle de Crau.</i>	35
<i>Figure II.2 : Climat moyen entre 1993 et 2003 en plaine de Crau – Données Domaine du Merle – Salon de Provence. Cumul moyen mensuel des précipitations et les moyennes mensuelles de température maximales et minimales.</i>	36
<i>Figure II.3. Evolution des conditions climatiques en plaine de Crau sur la période 2004 à 2006 - station météorologique du Domaine du Merle. Moyennes mensuelles des températures (courbe) et cumuls mensuels des précipitations et de l'Etref (barres).</i>	37
<i>Figure II.4 : Profil de sol de Crau sur la parcelle A, planche T</i>	39
<i>Figure II.5 : Variations (en m) du niveau de la nappe de Crau au bas de la parcelle B au cours de l'année 2002-2003 (a). La nappe atteint son plus haut niveau en période d'irrigation. Zoom sur la saison d'irrigation (b), après chaque irrigation T3 à T9, le niveau de la nappe augmente de plus d'un mètre avant de redescendre à l'équilibre. (Source étude sur la quantification des flux d'eau – IRD, 2002-2004).</i>	40
<i>Tableau II.1 : Les différentes espèces du foin de Crau</i>	41
<i>Figure II.6 : Zonage de la Crau retenu comme première base de stratification du territoire. 7 secteurs ont été retenus sur l'ensemble de la plaine. Seuls les secteurs A et B ont ensuite été enquêtés.</i>	44
<i>Figure II.7 : Evolution des exploitations agricoles et de la prairie en Crau entre 1988 et 2000. Evolution du nombre d'exploitations, de la surface agricole utile et des surfaces toujours en herbe dans l'ensemble des communes de Crau. . Source RGA 2000 (Djouabi, 2004).</i>	45
<i>Tableau II.2 : part des exploitations de taille 0-20 ha, 20-40 ha, 40-100 ha et supérieure à 100 ha en nombre d'exploitations, pourcentage d'exploitations et % de la surface en prairie représentée. Source : Communication du Comité du foin de Crau.</i>	45
<i>Figure II.8. Répartition des exploitations agricoles de Crau par classe de surface en prairie. Source : Communication du Comité du foin de Crau.</i>	46
<i>Figure II.9 : % de la surface totale en prairie représentée par les différentes classes d'exploitations. Les exploitations sont classées par rapport à leurs surfaces de prairies. Source : Communication du Comité du foin de Crau.</i>	46
<i>Figure II.10. Evolution des surfaces totales des différentes cultures dans la plaine de Crau entre 1979 et 2000. Source RGA 2000 (Djouabi, 2004).</i>	47
<i>Tableau II.3 : Les différentes mesures réalisées : échantillonnage, fréquence, matériel.</i>	50
<i>Tableau II.4 : Grille d'échantillonnage proposée pour les enquêtes en exploitation.</i>	52

IX. TABLE DES ANNEXES

<i>ANNEXE 1 : PROFIL MOYEN DES DEUX PARCELLES EXPERIMENTALES</i>	<i>173</i>
<i>ANNEXE 2 : DECRET OFFICIEL AOC FOIN DE CRAU</i>	<i>180</i>
<i>ANNEXE 3 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL</i>	<i>183</i>
<i>ANNEXE 4 : L'ENQUETE AUPRES DES IRRIGANTS DE CRAU</i>	<i>185</i>
<i>ANNEXE 5 : DESCRIPTION DU MODELE DE CULTURE</i>	<i>191</i>
<i>ANNEXE 6 : RESULTATS D'EXPERIMENTATION 2006</i>	<i>196</i>
<i>ANNEXE 7 : CONTRIBUTIONS DU TRAVAIL DE THESE AU QUESTIONS SCIENTIFIQUES POSEES DANS LE CHAPITE I</i>	<i>198</i>

ANNEXES

X. ANNEXES

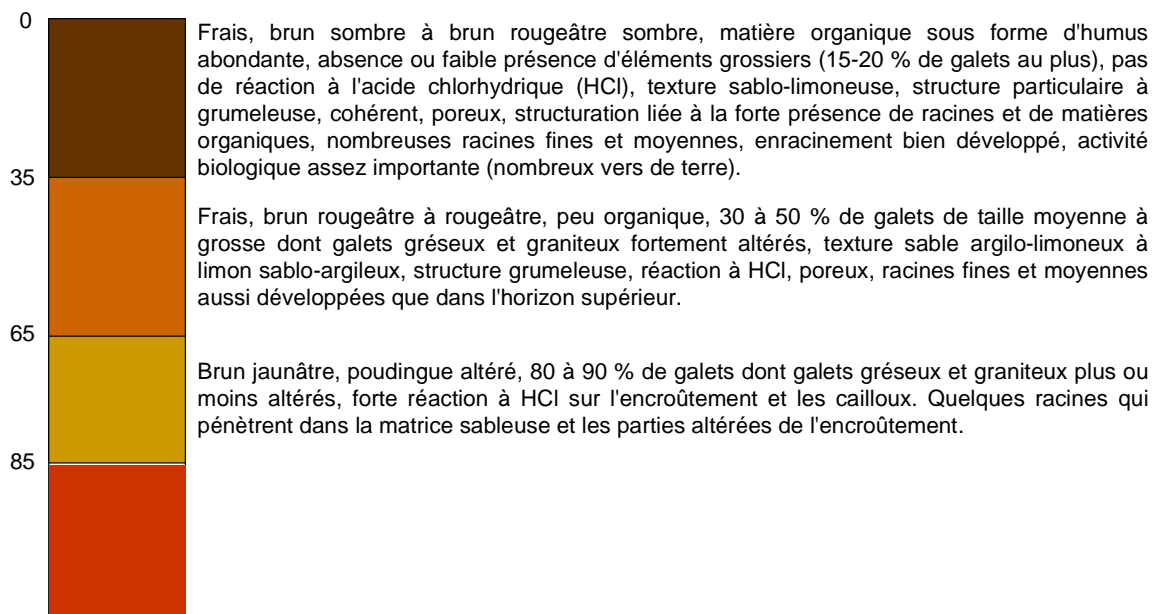
ANNEXE 1 : PROFIL MOYEN DES DEUX PARCELLES EXPERIMENTALES

(parcelle 1J – A et parcelle 6N – B)

Profil moyen de la parcelle 1J

Profondeur

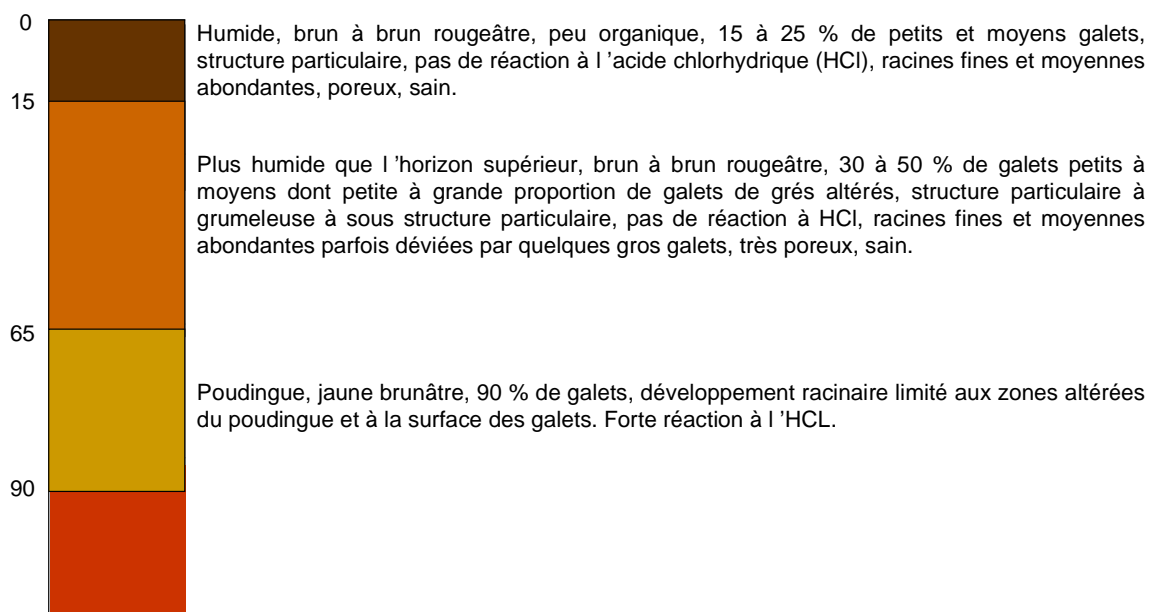
(cm)



Profil moyen de la parcelle 6N

Profondeur

(cm)



DESCRIPTIONS DES PROFILS DE SOL

COMPTE-RENDU DE LA JOURNEE DU 27 MAI 2005

Anne MEROT

1- Objectifs de la journée :

- connaissance du sol de la parcelle 1J
- recherche d'éléments pouvant expliquer les différences de rendements entre l'amont et l'aval de la parcelle
- prélèvements d'échantillons (mottes → densité apparentes, sol → densités racinaires, teneurs en eau)

2- Présents :

F Charron (Domaine du Merle), J-C Lacassin (SCP), B Jaillard (UMR R&S), D Tronc (Comité du foin de Crau), C Isbérie (Cemagref), A Mérot (SCP), F Willaert (Domaine du Merle), J Boisseau (Cemagref), V Brun (SCP).

3- Déroulement de la journée :

- 8h : ouverture des fosses
- 9h30 : description des fosses
- 14h00 : prélèvements des mottes et autres échantillons
- 18h00 : fermeture des fosses

Profondeur des fosses limitée par la présence du Poudingue à moins de un mètre

4- Observations des fosses

<u>Profil 1</u>	<p>Parcelle 1J Calan traditionnel (entrée parcelle) Fosse 1 (en haut de parcelle, haut du site 1)</p> <p>Bonne pénétration de l'eau, enracinement sain et bien développé dans les premiers horizons, sol bien aéré (présence de nodosités en profondeur) Sol issu de l'altération du poudingue en particulier des galets gréseux et enrichi en limons par les eaux d'irrigation Sol reposant sur une roche mère imperméable mais fissurée et altérée</p>
	<p>2 horizons de sols fosse ouverte jusqu'à 45 cm Bonne pénétration de l'eau, enracinement sain et bien développé dans les premiers horizons Sol issu de l'altération du poudingue en particulier des galets gréseux et</p>

		enrichi en limons par les eaux d'irrigation Sol reposant sur une roche mère imperméable mais fissurée et altérée
Horizon de surface A :		Texture : Sable argilo-limoneux (Sal) <u>Structure</u>
0 – 10/12 cm		

25 - 60 cm	Couleur : Couleur : Rouge-jaunâtre (5YR4/6) Taux de cailloux : 40-50% Racines : ++ à +++ racines nombreuses, certaines présentes des nodosités Activité biologique : oui (lombrics) Autres commentaires : lombric à 40 cm, points rougeâtres, grès altérés, nodosités, sol frais (plus frais que les profils 1 et 3)
Horizon B2: 60 – 90 cm	Poudingue altéré friable au couteau, encroûtement calcaire notable Horizon plus argileux Texture : sableuse (S/Sa) Couleur : brun-rougeâtre Taux de cailloux : 90% (granites, grès altérés,...) Racines : +, quelques racines fines qui descendent dans les zones altérées, chevelu racinaire plaqué contre les galets Sol frais Activité biologique : oui (un lombric) Commentaires : descente de l'argile dans des petites poches, présence de petits graviers calcaires, nodosités à 80 cm (bonne aération)
Horizon C : 90 cm	Poudingue peu altéré, racines bloquées par ce poudingue Pas de signe d'accumulation de l'eau

<u>Profil 3</u>	Parcelle 1J Calan piloté Fosse 1 (en haut de parcelle, haut du site 1) Bonne pénétration de l'eau, enracinement sain et bien développé dans les premiers horizons, sol bien aéré (présence de nodosités en profondeur) Sol issu de l'altération du poudingue en particulier des galets gréseux et enrichi en limons par les eaux d'irrigation Sol reposant sur une roche mère imperméable mais fissurée et altérée
	3 horizons de sols fosse ouverte jusqu'à 70 cm Bonne pénétration de l'eau, enracinement sain et bien développé dans les premiers horizons Sol issu de l'altération du poudingue en particulier des galets gréseux et enrichi en limons par les eaux d'irrigation Sol reposant sur une roche mère imperméable mais fissurée et altérée
Horizon de surface A : 0 – 13/15 cm	Texture : Sable argilo-limoneux (Sal) <u>Structure</u> : grumeleuse avec une sous structure particulière pas très nette Couleur : Brun-rougeâtre foncé (5YR3/4) Taux de cailloux : 5% Racines : +++, nombreuses racines fines dont certaines avec nodosités (taille variée, moins que le profil 2) Activité biologique : oui (lombrics) Autres commentaires :
Horizon B1 :	Texture : + argileux que l'horizon de surface (LAS)

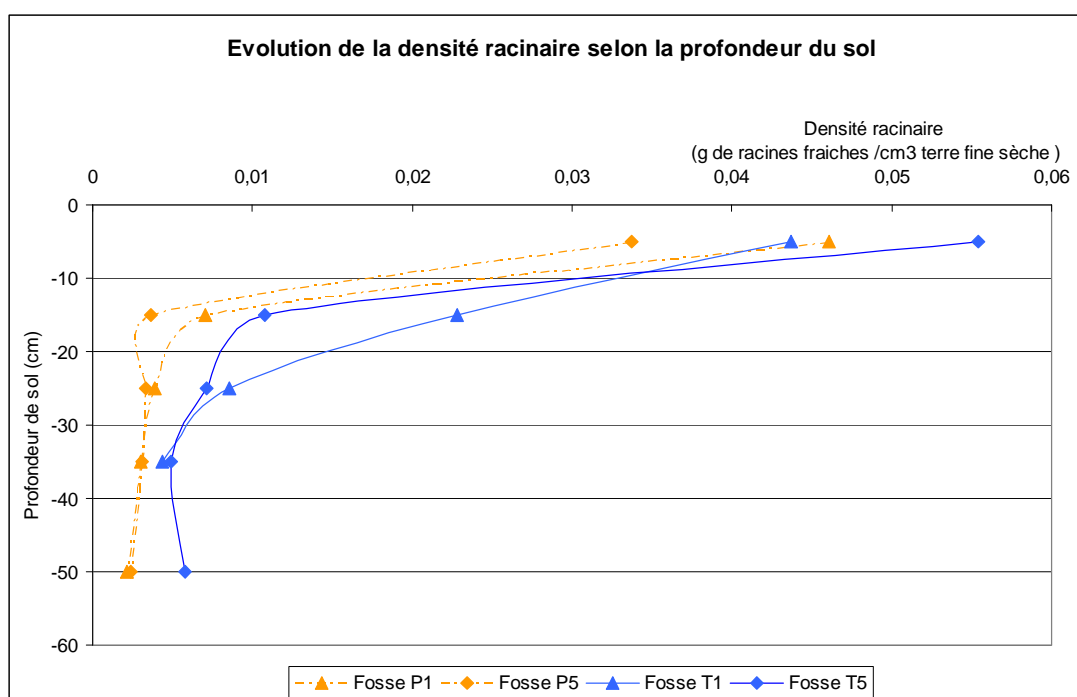
	Activité biologique : oui (lombrics) Autres commentaires :
Horizon B2 : 50 – 80 cm	Poudingue altéré plus ou moins épais, friable au couteau, encroûtement calcaire notable Horizon plus argileux Texture : sableuse (S/Sa) Couleur : brun-rougeâtre Taux de cailloux : 90% (granites, grès altérés,...) Racines : +, quelques racines fines (légumineuses) qui descendent dans les zones altérées, chevelu racinaire plaqué contre les galets Sol frais Activité biologique : oui (un lombric) Commentaires : descente de l'argile dans des petites poches,
Horizon C : 80 cm	Poudingue peu altéré, racines bloquées par ce poudingue Pas de signe d'accumulation de l'eau

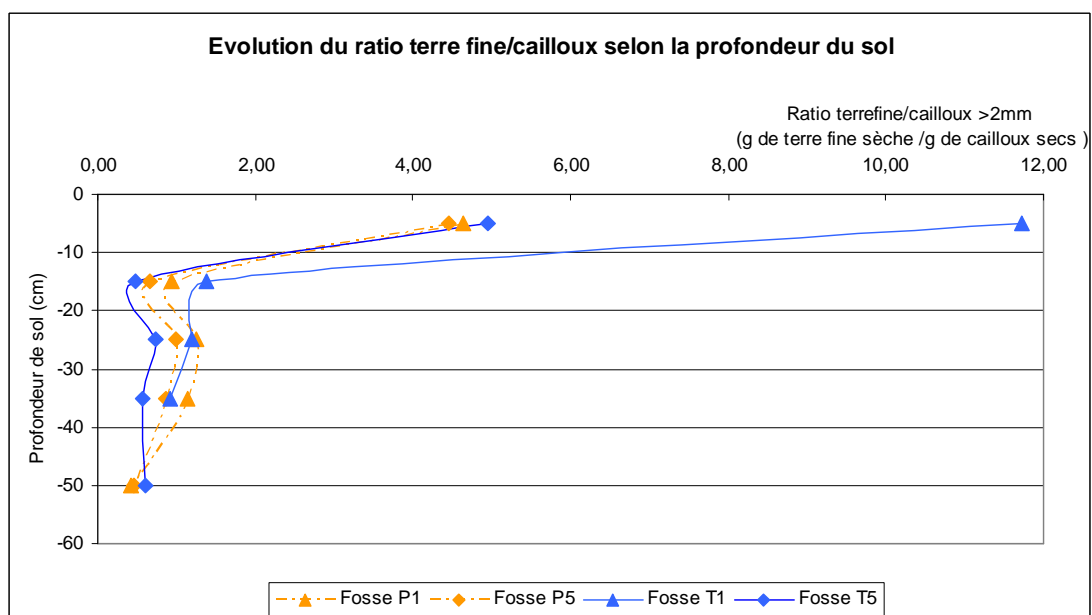
5-Résultats

- Prélèvements réalisés

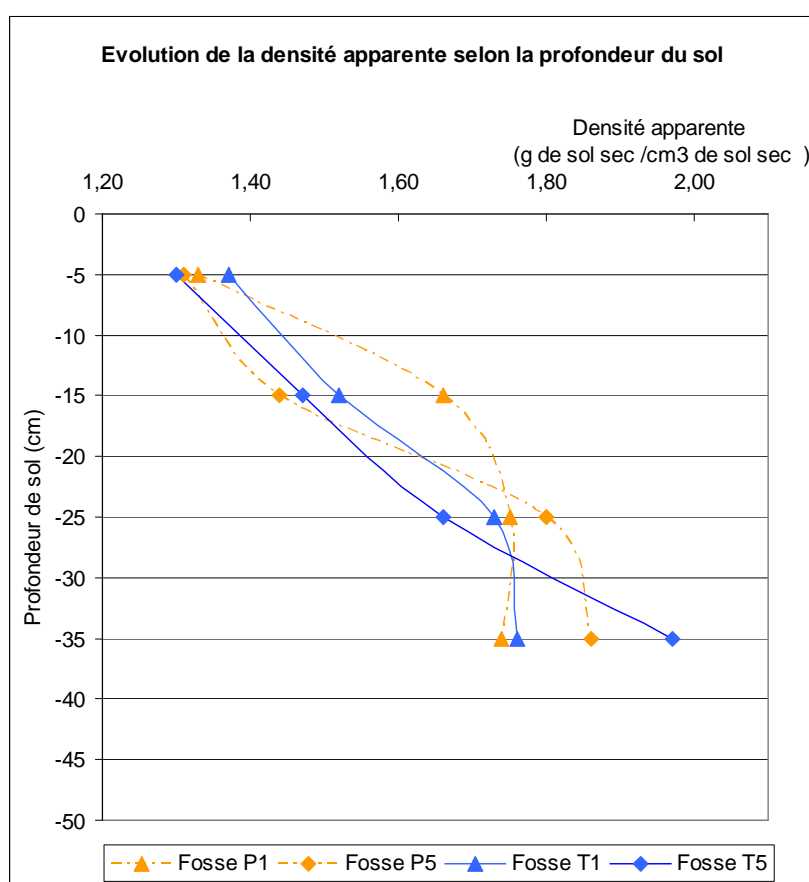
- 57 échantillons (1) avec racines, avec cailloux pour l'évaluation des densités racinaires (trois répétitions/site/profondeur),
- 19 échantillons (2) avec racines, peu de cailloux pour l'évaluation de la teneur en eau,
- 72 échantillons (3) pour l'évaluation des densités apparentes (4 mottes/site/profondeur)

- Profils de densités racinaires obtenus





- Profil des densités apparentes



ANNEXE 2 : DECRET OFFICIEL AOC FOIN DE CRAU

J.O n°224 du 26 septembre 1999 page 14357

Textes généraux

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie

Décret du 23 septembre 1999 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau »

NOR:

ECOC9900058D

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre de l'économie, des finances et de l'industrie et du ministre de l'agriculture et de la pêche,

Vu le règlement (CEE) no 2081/92 du Conseil du 14 juillet 1992 relatif à la protection des indications géographiques et des appellations d'origine des produits agricoles et des denrées alimentaires ;

Vu le code rural, et notamment ses articles L. 641-3 et L. 641-6 ;

Vu le décret no 91-368 du 15 avril 1991 portant organisation et fonctionnement de l'Institut national des appellations d'origine ;

Vu les délibérations du comité national des produits agro-alimentaires de l'Institut national des appellations d'origine en date du 24 mars 1999,

Décrète :

Art. 1er. - Seul a droit à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » le foin répondant aux conditions de production définies par le présent décret.

Art. 2. - **Aire de production.** - Les foins doivent provenir de prairies situées dans l'aire géographique de production définie par un périmètre à l'intérieur du territoire des communes du département des Bouches-du-Rhône suivantes : Arles, Aureille, Eyguières, Fos-sur-Mer, Grans, Istres, Lamanon, Miramas, Mouriès, Saint-Martin-de-Crau, Salon-de-Provence. Ce périmètre, tel qu'il a été approuvé par le comité national des produits agroalimentaires de l'Institut national des appellations d'origine au cours de sa séance du 23 avril 1997, sur proposition de la commission d'experts nommée à cet effet, fait l'objet d'un document cartographique déposé dans les mairies des communes concernées.

Art. 3. - **Identification des prairies.** - Les foins doivent être récoltés dans des prairies identifiées, situées dans l'aire définie à l'article 2. L'identification des prairies est faite sur la base de critères liés au lieu d'implantation desdites prairies respectant les conditions de production définies dans le présent décret. La liste des prairies est établie par le comité national des produits agroalimentaires de l'Institut national des appellations d'origine (INAO), sur avis d'une commission d'experts désignée par ledit comité, après contrôle des parcelles pour lesquelles une demande a été déposée. Cette liste est déposée auprès des services de l'INAO.

Pour permettre l'établissement de cette liste et sa mise à jour, tout producteur désirant faire identifier une prairie doit en faire la demande auprès des services de l'INAO à l'aide d'un imprimé fourni par ces services, avant le 1er mars de l'année qui précède la première déclaration d'aptitude portant sur cette prairie, et souscrite en application du décret relatif à l'agrément de l'AOC « Foin de Crau ».

Cette demande comporte notamment les références cadastrales de la parcelle, la superficie en production et la date d'implantation de la prairie. Toute modification telle que retournement, implantation, vente, achat, location est notifiée aux services de l'INAO avant le 1er mars qui suit ladite modification.

Art. 4. - **Composition floristique.** - Les foins doivent provenir exclusivement de prairies dont la composition floristique est définie comme suit :

Espèces obligatoirement et majoritairement présentes

Fromental (*Arrhenatherum eliatum*).

Dactyle pelotoné (*Dactylis glomerata*).

Trèfle violet des prés (*Trifolium pratense*).

Trèfle rampant (*Trifolium repens*).

Espèces dont la présence exclut du bénéfice de l'appellation d'origine

Laîche à épis distants (*Carex distant*).

Laîche des bois (*Carex nemorosa*).

Laîche glauque (*Carex glauca*).

Laîche tomenteuse (*Carex tomentosa*).

Laîche velus (*Carex hirta*).

Scirpe en jonc (*Scirpus holoschoenus*).

Jonc à fleurs obtuses (*Juncus obtusiflorus*).

Roseau commun (*Arundo phragmites*).

Prêle rameuse (*Equisetum ramosissimum*).

Prêle des champs (*Equisetum arvense*).

Colchique d'automne (*Colchicum autumnale*).

Orchis des marais (*Orchis palustris*).

Plantain d'eau (*Alisma plantago*).

Menthe aquatique (*Mentha aquatica*).

Lentille d'eau (*Lemna minor*).

Souchet (*Scirpus maritimus*).

Hydrocotyle (*Hydrocotyle vulgaris*)

Art. 5. - Conduite de la prairie. - Les prairies doivent être conduites dans les conditions suivantes :

Implantation de la prairie : la prairie est implantée soit à partir d'un semis de luzerne, soit à partir d'un semis réalisé avec un mélange de graminées et de légumineuses, soit par un ensemencement naturel activé par un épandage de foin de Crau appelé « Fond de Fenièr ».

Irrigation : l'irrigation est réalisée de mars à octobre, à raison d'une irrigation tous les huit à douze jours. L'irrigation se fait par submersion à partir des fossés d'arrosage. La prairie est submergée pendant plusieurs heures, selon la répartition du tour d'eau.

Fertilisation : la fertilisation azotée est limitée à soixante unités par hectare et par an d'azote minéral (fumure organique exceptée). L'épandage traditionnel de fumier est admis ; les modalités et dates d'épandage doivent être choisies de telle sorte que l'on ne retrouve pas de fumier dans le foin.

Art. 6. - Production. - Ne peuvent prétendre à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » que les foins récoltés dans des prairies dont la production ne dépasse pas dix tonnes par hectare et par an pour l'ensemble des trois coupes. Pour une récolte déterminée, en cas de situation exceptionnelle, le rendement peut être diminué ou augmenté par décision du comité national des produits agroalimentaires prise après avis de l'organisme chargé de la défense de l'appellation considérée. Le bénéfice de l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » ne peut être accordé aux foins provenant de jeunes prairies qu'à partir de la cinquième année suivant celle au cours de laquelle l'implantation a été réalisée.

Art. 7. - Récolte et stockage. - La récolte se répartit en trois coupes. La première coupe doit être réalisée au cours du mois de mai et soixante jours minimum après le pâturage du regain. Le délai entre chaque coupe doit être de quarante jours minimum à soixante-dix jours maximum. Les trois coupes doivent être achevées respectivement avant le 31 mai, avant le 25 juillet, avant le 30 septembre, sauf dérogation particulière donnée par les services de l'INAO.

Toute la production susceptible d'être revendiquée en appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » doit être bottelée avec la seule ficelle bicolore composée de brin blanc et rouge que l'organisme chargé de la défense de l'appellation est seul habilité à diffuser.

Le foin ne doit pas rester sur le champ plus de cinq jours pour la première et la troisième coupe, plus de trois jours pour la deuxième coupe.

Le foin pressé doit être rentré le jour même ; toutefois, en cas de fort mistral, les bottes ou les balles peuvent rester une nuit sur le champ.

Le foin est stocké sous un hangar.

Le foin doit être isolé du sol et des parois du hangar.

Art. 8. - **Agrément.** - Le foin commercialisé sous l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » doit satisfaire aux dispositions du décret relatif à l'agrément du foin bénéficiant de l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » pris en application des articles L. 641-3 et L. 641-6 du code rural.

Art. 9. - L'emploi de toute indication ou de tout signe susceptible de faire croire à l'acheteur qu'un foin a droit à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » alors qu'il ne répond pas à toutes les conditions fixées dans le présent décret sera poursuivi conformément à la législation générale sur la répression des fraudes et sur la protection des appellations d'origine.

Art. 10. - Le décret du 31 mai 1997 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Foin de Crau » est abrogé.

Art. 11. - Le ministre de l'économie, des finances et de l'industrie, le ministre de l'agriculture et de la pêche et la secrétaire d'Etat aux petites et moyennes entreprises, au commerce et à l'artisanat sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera publié au Journal officiel de la République française.

Fait à Paris, le 23 septembre 1999.

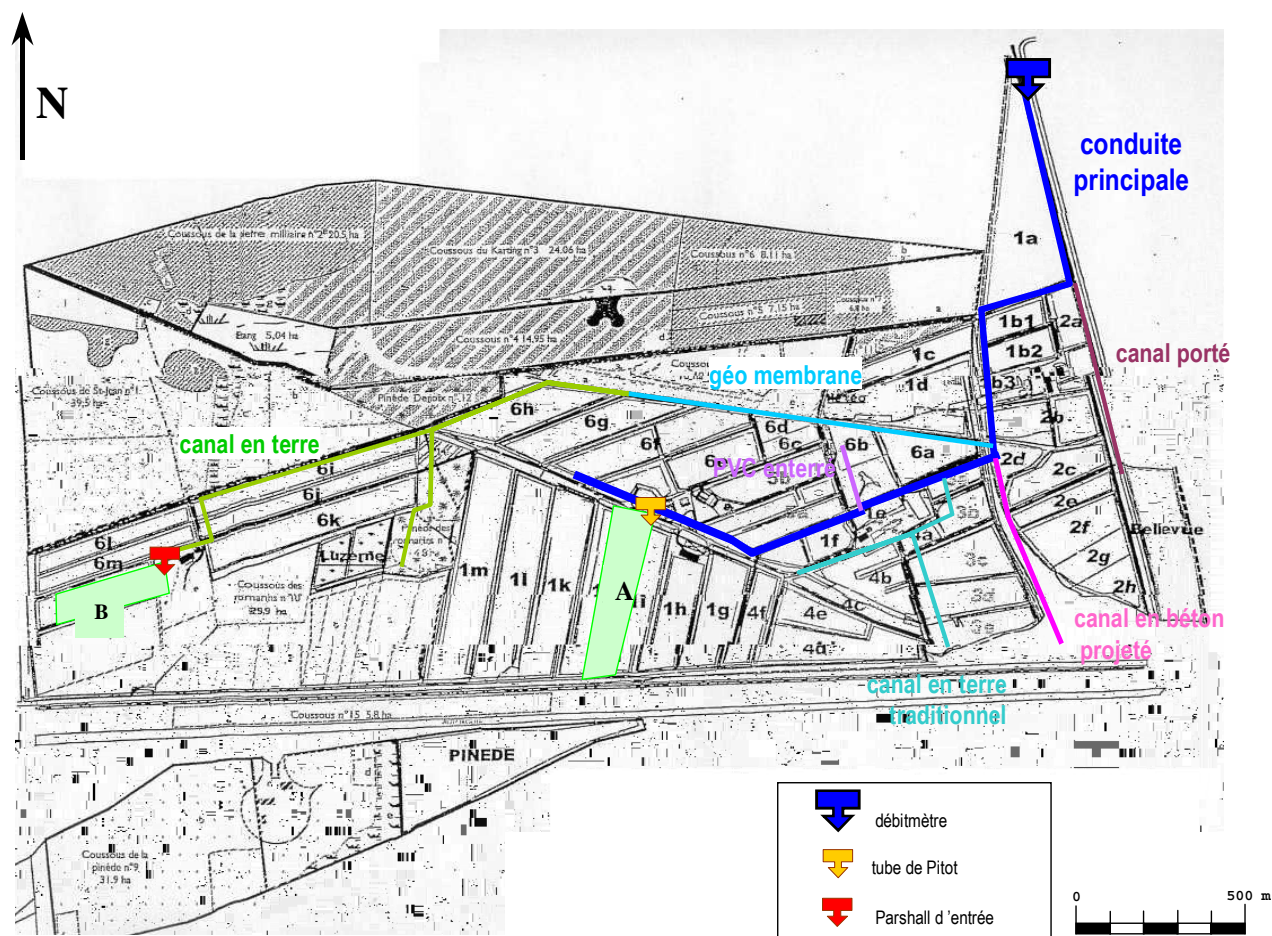
Par le Premier ministre :
Lionel Jospin

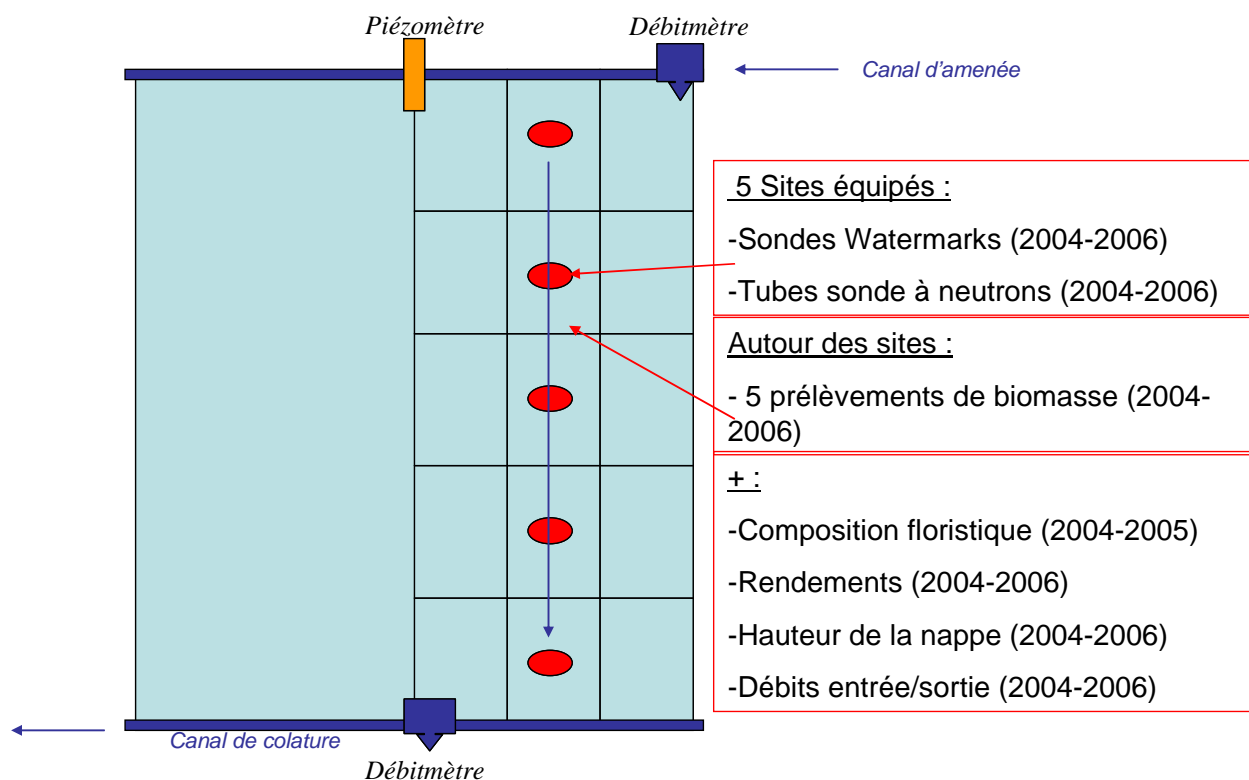
Le ministre de l'économie,
des finances et de l'industrie,
Dominique Strauss-Kahn

Le ministre de l'agriculture et de la pêche,
Jean Glavany

La secrétaire d'Etat
aux petites et moyennes entreprises,
au commerce et à l'artisanat,
Marylise Lebranchu

ANNEXE 3 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL





Dispositif expérimental : Les deux parcelles expérimentales A et B sont composées de deux planches d'irrigation. Chaque planche a été suivie de 2004 à 2006.

Questionnaire d'enquête**Partie 1 : caractérisation de l'exploitation**

N° d'enquête :

Nom et adresse :

N° de tel :

Statut de l'enquêté

Responsabilités syndicales

A / histoire de l'exploitation

Date d'installation

Productions de départ

Conditions de reprise (A qui ?, achat, fermage ?)

Origines du chef d'exploitation (Formation, région d'origine, activité avant installation, âge)

Motivation de production ? (Qualité de vie, héritage, goût, augmentation du revenu)

Présentation des modifications qui ont marqué l'histoire de votre exploitation (surfaces de foin, nouvelles productions, achat/fermage surface, investissement, évolution de MO)

Pourquoi ces changements ?

Age de l'exploitant

Si plus de 50 ans, succession envisagée ?.

B) Caractéristiques principales

SAU totale

Productions

Statut de l'exploitation

Depuis quand ?

Nombre d'exploitants si GAEC, EARL...

Double actif/simple actif

Nombre total d'actifs agricoles

C/ assolement

Surfaces :

Totale.....

SAU.....

SAU irriguée.....

Surfaces en propriété, fermage, métayage baux verbaux, location (moutons) :

Propriété.....

Fermage.....
 Métayage.....
 Location.....

Date du dernier achat de terre : (achat avec droits d'eau ?)

Principales productions (si autres que foin : objectifs de production, SAU Irriguée ?, systématiquement irriguée, rdt/ha, vente ?, contrats, MO, %revenu)

Pourquoi ces choix de cultures ?

Comment avez-vous placé ces cultures sur exploitation, critères

D/ Interaction avec élevage ovin

Eleveur ?

Depuis quand ?

Taille du cheptel

Vente ?

G/ environnement socio-économique ?

Valorisation des produits végétaux

Travail sur la qualité

Stockage (vente d'une année sur l'autre report de vente ?) - spéculation

Prix moyen de vente ?

Prix de vente moyen 2003

Partie 2 : la conduite des prairies**A/Le parcellaire**

PARCELLE (N° parcelle/N° voie d'eau/taille/distance/culture/pente/épaisseur de sol/AOC/âge de la prairie/type de prairie/nivellée/zone stagnation eau/commune/Nbre de calan/sens arrosage/orientation/nord prairie/rendement moyen)

Surface prairies.....

SAU prairies en AOC

SAU prairies hors AOC, pourquoi hors AOC ?

Nombre de parcelles

SAU re-surfacée il y a moins de 5 ans

SAU nivelée depuis moins de 5 ans

Nivellement programmé tous les ans ?

Variabilité interannuelle du rendement (foin et autre)

Pourquoi ces variations ? Et en 2005 ?

Années 2003/2004/2005 bonnes années ? Pourquoi ?

B/Itinéraire technique et entretien des prairies

Apports fertilisants

Fumier ovien

Engrais minéral

Compost

Déjections animales (pâturage – période de pâture, nombre de passage – quelles prairies pâturées ?)

Evaluation de la dose d'engrais nécessaire ?

Analyses de sol ?

Désherbage (fréquence) :

Canaux

Parcelles

Coupe

Ordre (en fonction de quoi ?)

Fixe ?

Coupe : petites ou grandes bottes, balles ?

C/ matériel

Quels sont les principaux outils que vous utilisez sur exploitation

Rencontrez-vous des problèmes dans l'utilisation de ce matériel
 Bâtiments spécifiques ? stockage foin, matériel, élevage
 Etes-vous propriétaire du matériel ?
 Travaux en commun ?

Partie 3 : gestion de l'irrigation

A/ Accès à la ressource en eau

Gravitaire : nombre de prises
 Droits d'eau (débit et fréquence, fréquence variable ?) ? Fonctionnement de la distribution par prise.
 Quelles structures associées à ces droits d'eau (prévoir un tableau).
 Arrangement entre voisins ?
 Fréquence d'arrosage si accès de l'eau en continu
 Fréquence d'irrigation est-elle suffisante/besoin des prairies ?
 Quantité suffisante (débit ?)
 Débits variables ? En fonction de quoi ? (ordre de grandeur de la variation de débit)
 Débit théorique (l/s/ha) ?
 Utilisation de fossés de colature ?

B/ choix stratégiques hydrauliques dans l'exploitation

Matériel hors gravitaire: POMPAGE ?

C/ Irrigation des prairies

Comment avez- vous appris à irriguer ?
 Avez-vous modifié votre façon d'irriguer depuis que vous avez commencé, comment, pourquoi, références ?
 A quels points clés de l'irrigation apportez-vous le plus de soin ?
 Qu'est ce qui est le plus difficile avec l'irrigation des cultures ?
 Contrôlez-vous la qualité de l'arrosage ? (quels points de contrôle ?) et la quantité ?
 Fréquence optimale d'arrosage des prairies ?
 Pourquoi ?
 Evaluation des besoins en eau des prairies ? en fonction de quoi ?
 Débit moyen optimum pour arroser ces prairies ?
 Zones de stagnation ?
 Présence de colatures (fossés de récupération des eaux en bout de parcelle) ?

D/ Organisation de l'irrigation

Ordre d'irrigation (blocs identifiables) ?
 En fonction de quoi est-il fixé ?
 Gestion au plus près des durées d'irrigation ?
 Démarrage de la campagne ?
 Choix des durées d'irrigation ?
 Arrêt de l'irrigation
 En fin de saison

En cas de pluie

En fond de parcelle

Modification de l'ordre d'arrosage par rapport à la coupe ?

Tours de nuit ? Les week-end ?

Qui fait l'irrigation ? (main d'œuvre) fonctionnement de l'arroseur ? Horaires de travail et période de vacances ? Disponibilité, permanences ?

Entretien des martelières ?

Entretien des canaux ?

Fuites nombreuses ?

Quand pas assez d'eau (restrictions ou baisse de débit, ou...) changements dans le tour d'eau ? de quelle manière ?

Avez-vous toujours le temps d'arroser l'ensemble de vos parcelles ? sinon impact flore, vente ?

Entente pour eau entre voisins ?

Relation avec ASA ?

Innovations

Améliorations personnelles apportées au réseau

Martelières automatiques ?

E/ Gestion collective et réseau

Au niveau des prises

Problèmes rencontrés

Débits variable, baisses de volume contraignantes ?

Situation /prise d'eau ?

Pb technique concernant l'utilisation de votre réseau

Entretien du canal ?

Questions ouvertes

F/ Ressenti

/AOC

/ avenir des prairies

/ irrigation gravitaire

Guide d'entretien

Caractéristiques exploitation : SAU totale, irriguée, propriété, statut exploitation, dble actif, nbre d'actifs, revenus autres, pourquoi exploitation, productions et/ou élevage.

Historique : date installation, reprise, origine chef exploitation, modif qui ont marqué – production, achat terres, investissement matériel, pourquoi ? , âge, succession.

Assolement : SAU totale, irriguée, propriété, principales productions, pourquoi ces cultures, position dans exploitation) - Animaux ?

Elevage : taille du troupeau, vente, % revenu, MO, taux de renouvellement, parcours ou alpage, pâturage, location de terre, nbre de passage, faire courir ou engraissement.

Choix main d'œuvre : nbre total d'actifs agricoles, hors famille, place des loisirs, jours non travaillés, WE, vacances, repos, MO occasionnelle, recours entreprise-entraide.

Gestion financière : comparaison avec les marges proposées, emprunts, annuités, revenu moy/ha, charges structures, revenus autres.

Environnement socio-économique : valorisation des produits végétaux, travail sur qlté, stockage, prix de vente moyen.

La conduite des prairies

Parcellaire : SAU prairies AOC, hors AOC, nbre parcelle, nbre re-surfacées, nivelées, nivellement programmé, parcelle, canaux, taille, culture, épaisseur de sol, âge prairie, zone de stagnation d'eau, nbre de calan, rendement moyen, haies, variations de rendement, colatures

ITK : apports fertilisants, évaluation des doses d'engrais, analyses de sol, désherbages canaux parcelles, ordre de coupe, petites grandes balles

Matériel : principaux outils, pbs rencontrés, batiments de stockage, propriétaire matos, endettement, travaux en commun

Gestion de l'irrigation

Accès à la ressource : nbre de prises (plan), droits d'eau, fonctionnement par prise, arrangement entre voisins, fréquence, suffisante ? débits variables en fonction de quoi ? fossés colature

Irrigation des prairies : appris à irriguer, modif façon irriguer, points clefs de l'irrigation, le plus difficile, contrôle de la qualité d'arrosage et quantité, fréquence optimale d'irrigation, indicateur de dessèchement, débit moyen optimum, zones de stagnation

Organisation de l'irrigation : ordre d'irrigation, fonction quoi, gestion des durées, démarrage de la campagne, arrêt irrigation pluie, fin saison, fond de parcelle, coupe et arrosage, tour de nuits, WE, horaires de travail, permanences, entretien cx et martellières, fuites, réactions aux manques d'eau, temps de tout arroser sinon impact ?, relation ASA, innovations, améliorations particulières, martelières automatiques,

Gestion collective : pb rencontrés, restriction, cout de l'eau entretien du canal, utilisation du réseau,

Ressenti : /AOC, /prairies, /irrigation gravitaire

ANNEXE 5 : DESCRIPTION DU MODELE DE CULTURE

The model calculations begin on 1 February, at which date the Available Soil Water ASW, the residual LAI and DM, the initial LAI and DM are initialized. Then the model turns each day.

State (*Italics*) and intermediary variables of the model

Name	Unit	Description (Initial values)
Climatic and temporal variables		
DOY	unitless	Day of year
ST	°C	Sum of temperature from 1 February to day d (0)
Tb	°C	Base temperature
Variables of soil water		
ETa	mm	Actual evapotranspiration on day d
ASW	mm	<i>Available Soil Water</i> on day d (SWC_year)
FTSW	unitless	Fraction of Transpirable Soil Water on day d
Fwi	unitless	Coefficient of Water Stress on day d
Drainage	mm	Cumulative drainage on day d (0)
Variables of RUE calculation		
RUE	g DM.MJ ⁻¹	Radiation Use Efficiency on day d
RUE G	g DM.MJ ⁻¹	Part of Radiation Use Efficiency due to grasses on day d
RUE L	g DM.MJ ⁻¹	Part of Radiation Use Efficiency due to other species than grasses on day d
fT	Unitless	Temperature function of RUE on day d
fd	Unitless	Seasonal function of RUE on day d
frepro	Unitless	Reproduction function of RUE on day d
Variables of PAR calculation		
PARa		Photosynthetically active radiation intercepted on day d
epsi		Radiation interception Efficiency on day d
Variables of LAI calculation		
LAI	Unitless	<i>Leaf Area Index (LAI_res_0)</i>
LAIres	Unitless	Pool of LAI for the calculation of senescence on day d (LAI_res_0)
Variables of DM calculation		
DM	t.Ha ⁻¹	<i>Aboveground biomass accumulated in dry matter</i> on day d
Dmgrowth	t.Ha ⁻¹	(DM_res_0)
Dmres	t.Ha ⁻¹	Aboveground biomass growth on day d
Dmsen	t.Ha ⁻¹	Pool of DM for the calculation of senescence on day d (DM_res_0)
		Part of biomass lost by senescence on day d

Input variables in the model

Name	Units	Description
Climatic data		
Tm	°C	Daily mean temperature on day d
Wind	m.s ⁻¹	Wind speed on day d
P	mm	Rainfall water supply on day d
Rg	MJ.m ⁻²	Global solar radiation on day d
ETref	mm	Reference Evapotranspiration on day d
Soil data		
TTSW	mm	Total Transpirable Soil Water
SWC_0	mm	Initial ASW
FTSW_1	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_2	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_fwi_1	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
FTSW_fwi_2	-	Parameter of the relation between FTSW and fwi
Plant data		
Tc	°C	Thermal time of the beginning of reproduction stage
Tflo	°C	Thermal time for flowering

L1	-	Proportion of other species than grasses for the 1 st mowing
L2	-	Proportion of other species than grasses for the 2 nd mowing
L3	-	Proportion of other species than grasses for the 3 rd mowing
Technical data		
I	mm	Irrigation water supply on day d
Ni	-	Indices of nitrogen status
LAIres_coupe	-	Residual LAI after a mowing
Dmres_coupe	t.Ha ⁻¹	Residual DM after a mowing
Coupe	-	Number of the mowing

Parameters of the model (calculated from others parameters, biblio, adjustable)

Name	Units	Source	Description
Adjustable parameters			
Vent_p1 Amplitude_frepro RUE_rate LAI_rate LAI_rate_p1 LLSmin	m.s-1 g DM.MJ ⁻¹ g DM.MJ ⁻¹ m ² .m-2.d-1 - °C	Adjustable parameters	Maximal wind speed from which ETa is considered as null Maimum value of frepro during reproduction phase RUE rate Coefficient of leaf extension rate Coefficient of correction of LAI rate during the 1 st mowing Duration of leaf life span
Bibliographic parameters			
Tb_min Tb_max fT_p1 fT_p2 fT_3 Fd_p1 fd_p2 RUErepro_p1 RUErepro_p2 Epsi_p1 K α GLAI_p1 λ Dmres_p1, Dmres_p2 fNi_p1 fNi_p2 frepro_p4	°C °C -		

RUE_repro_max	g DM.MJ ⁻¹	=amplitude_frepro-	Maximum of radiation use efficiency
FTSW_a	-	frepro_p1*Tpic^2-	Parameters of the relation between FTSW and
FTSW_b	-	frepro_p2*Tpic	fwi
FTSW_moy	-	=Amplitude_frepro	Critical FTSW from which there is an impact of
fNi	-	=FTSW_fwi_1/(FTSW	wind on LAI and RUE
		_1-FTSW_2)	Coefficient of nitrogen status
		=FTSW_2*FTSW_a+	
		FTSW_fwi_2	
		=	
		(FTSW_1+FTSW_2)/2	
		=fNi_p1*Ni+fNi_p2	

I. Thermal time and time from 1st February

Thermal time was calculated as presented below. It let to identify the 3 different stages of plant development: from mowing (or 1st February if the 1st mowing) to the beginning of reproductive stage, reproductive stage from TC to Tflo, maturity stage from Tflo to mowing.

Tb: If (Tm < Tb_min) then Tb = 0
if (Tm > Tb_max) then Tb = Tb_max – Tb_min
Else Tb = Tm-Tb_min

ST: If coupe = 1 then ST = Tb
Else ST = ST + Tb

II. Soil water processes

Soil module consists in a simple water balance applied on a one-layer reservoir of soil. From this water balance, water stock (ASW) is evaluated each day d. It is then used for calculation of FTSW and fwi. The calculation of Actual Evapotranspiration (ETa) is based on ETref moderated by FTSW.

ASW: If ASW(d-1) + P(d-1) + I(d-1) – ETa(d-1) > TTSW then ASW = TTSW
Else ASW = ASW(d-1) + P(d-1) + I(d-1) – ETa(d-1)

$$\text{FTSW: } FTSW = \frac{ASW}{TTSW}$$

ETa: If (vent > vent_p1 et FTSW < FTSW_1) then ETa = 0
If FTSW > FTSW_1 then ETa = ETref
Else ETa = (ETref * FTSW) / FTSW_1

Fwi: If FTSW > FTSW_1 then fwi = 1
If FTSW < FTSW_2 then fwi = 0
Else fwi = FTSW_a* FTSW + FTSW_b

III. Radiation Use Efficiency

Radiation Use Efficiency is simulated in the model from the maximum RUE that is corrected by seasonal effect (fd), reproductive effects (frepro), temperature effect (fT), nitrogen stress (fNi) and water stress (fwi). Two groups of species were considered for the calculation. Grasses G were affected by all these effects but the other species L (mostly legumes) were not affected by reproductive effects or nitrogen stress. Finally, a wind effect was considered related to water deficit.

Fd: $fd = (fd_p1 * DOY + fd_p2)/2$

Frepro: If $ST < T_c$ then $frepro = 1$

If $ST < T_{flo}$ then $frepro = frepro_p1 * ST^2 + frepro_p2 * ST + frepro_p3$

Else $frepro = frepro_p4 - RUE_{repro_max}$

fT: $fT = fT_p1 + fT_p2 * \min(T_m, T_{b_max}) + fT_p3 * (\min(T_m, T_{b_max}))^2$

RUE: If $(vent > vent_p1 \text{ and } FTSW < FTSW_moy)$ then $RUE = 0$

Else

If $Coupe = 1$ then

$RUE_{grasses} = RUE_rate * fNi * fwi * fT * fd * frepro * (1-L) * (1 + LAI_rate_p1 * Dmres_0)$

$RUE_L = RUE_rate * fwi * fT * fd * L$

$RUE = RUE_{grasses} + RUE_L$

Else

$RUE_{grasses} = RUE_rate * fNi * fwi * fT * fd * frepro * (1-L)$

$RUE_L = RUE_rate * fwi * fT * fd * L$

$RUE = RUE_{grasses} + RUE_L$

IV. Intercepted radiation active for photosynthesis processus

Intercepted radiation for photosynthesis depends on the radiation interception efficiency (epsi) depending on LAI.

Epsi: $Epsi = epsi_p1 * (1 - \exp(-k * LAI))$

PARa: $PARa = \alpha * epsi * Rg/100$

V. Leaf Area Index

LAI is one of the 3 status variable in the model, it is evaluated from the difference between to flows: an increase of LAI (GLAI) minus a lost of LAI by senescence mechanics (SLAI). LAI is re-initialized after each mowing.

LAI: If $coupe = 1$ then $LAI = LAI_{res_coupe}$

Else $LAI = \max(0 ; LAI + GLAI - SLAI * (1-L))$

Increase in LAI on day d

Increase in LAI on day d (GLAI) is a function of thermal time corrected by stress factors for nitrogen (fNi) and water (fwi) stresses (see below).

GLAI: If $(vent > vent_p1 \text{ et } FTSW < FTSW_moy)$ then $GLAI = 0$

Else

If $Coupe = 1$ then

$GLAI = LAI_rate * (LAI_rate_p1 + 1) * (GLAI_p1 * 10^{-3}) * Tb^2 * Ni * fwi$

Else

$GLAI = LAI_rate * (GLAI_p1 * 10^{-3}) * Tb^2 * Ni * fwi$

LAI in senescence

The fraction of LAI that is senescent is then calculated from the residual LAI.

LAIres: If $ST < LLSmin$ then $LAIres = LAI_{res_0}$

If $ST(d-1) < LLSmin$ et $ST(d) \geq LLSmin$ then $LAIres = LAI(LLSmin)$

If $ST(d-1) < 2LLSmin$ et $ST(d) \geq 2LLSmin$ then $LAIres = LAI(2LLSmin)$

Else $LAIres = LAIres$

SLAI: $SLAI = LAIres * (Tm/LLSmin)$

VI. Aboveground Dry Matter

Aboveground Dry Matter (Dmnet) is the 3rd status variable and is evaluated as the difference between the increase of biomass (Dmgrowth) and senescence (Dmsen) which is evaluated from the certain pool of biomass (Dmres).

Dmgrowth: $Dmgrowth = RUE * PAR / 100$

Dmres: If $ST < LLSmin$ then $Dmres = Dmres_0$

If $ST(d-1) < LLSmin$ et $ST(d) \geq LLSmin$ then $DMres = DMnet(LLSmin)$

If $ST(d-1) < 2LLSmin$ et $ST(d) \geq 2LLSmin$ then $DMres = DMnet(2LLSmin)$

Else $Dmres = Dmres$

Dmsen: If $ST < LLSmin$ then $Dmsen = (1-\lambda) * Dmres * (Tm/LLSmin)$

If $ST \geq 2LLSmin$ then $Dmsen = (1-\lambda) * Dmres * (((Dmres_p1 * Dmres/100)^{Dmres_p2} * (Tm/LLSmin)$

Else $Dmsen = (1-\lambda) * Dmres * (Tm/LLSmin)$

Dmnet : If $coupe = 1$ then $Dmnet = DM_res_coupe$

Else $Dmnet = Dmnet + Dmgrowth - Dmsen * (1-L)$

V. Drainage

If $AW + P + I - AT > RU$ then $Drainage = Drainage + AW + P + I - AT - RU$

Else $Drainage = Drainage$

ANNEXE 6 : RESULTATS D'EXPERIMENTATION 2006

L'expérimentation présentée dans le chapitre III (fonctionnement du système prairial sous déficit hydrique modéré) a été menée en 2006. Les résultats sont présentés ci-dessous. La présentation du chapitre III a été reprise.

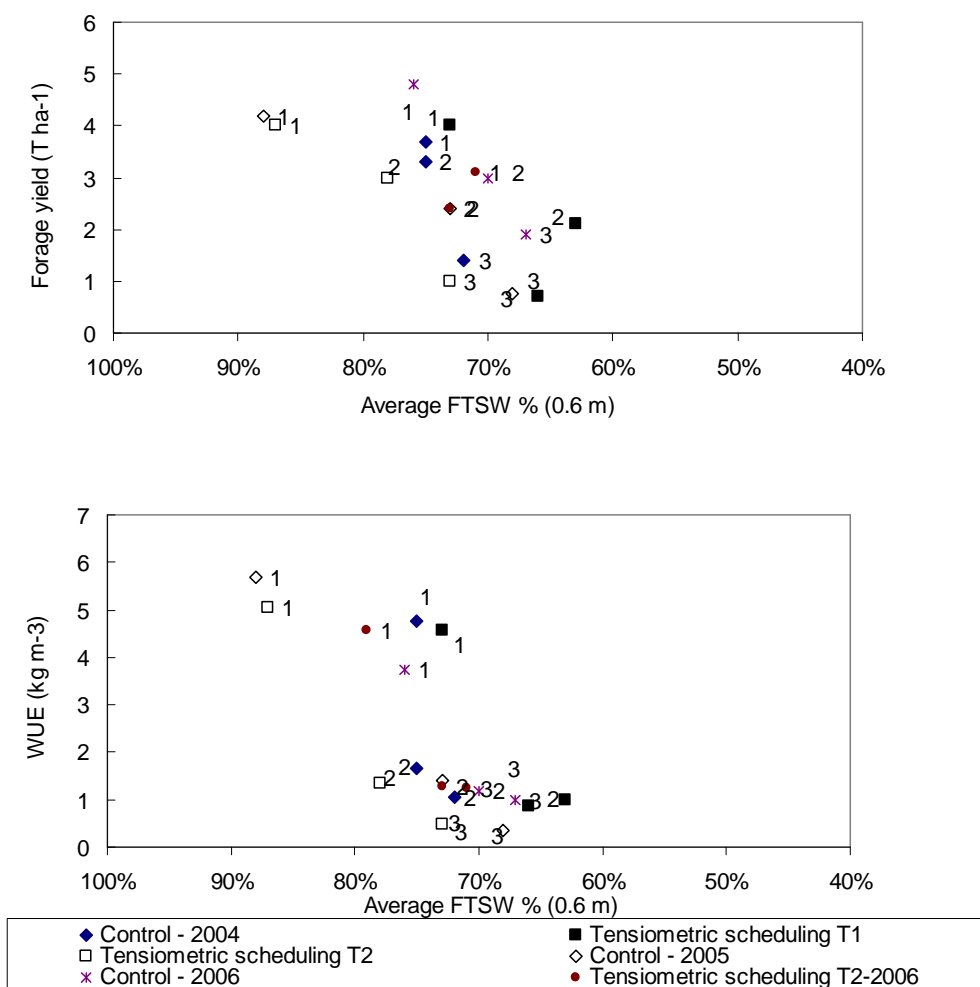
Table 1: Water fluxes at field scale for all irrigation treatments tested in 2004 and 2005 (Control and Tensiometric scheduling T1 and T2 in the 2 experimental fields A and B).

Field	Year	Treatment	Rainfalls (mm)	Etref - R (mm)*	Water Supply (mm)	Water loss (mm)	Er (mm) **	Deep Drainage (mm)	Mean Supply per irrigation event (mm)	Number of irrigation
A	2004	Control	92	635	2072	404	498	1262	150	14
		T1	92	635	1500	NM	474	NM	149	10
	2005	Control	69	804	2182	384	519	1348	183	12
		T2	69	804	2728	387	575	1835	181	15
	2006	Control	65	824	2323	561	642	1185	178	13
		T2	65	824	2781	407	695	1744	185	15
B	2004	Control	92	635	2415	255	466	1786	214	11
		T1	92	635	1630	200	605	917	235	7
	2005	Control	119	812	3075	787	677	1730	235	13
		T2	119	812	4237	1037	762	2557	255	10

Table 2: Yields and Water Use Efficiency (WUE) of Control and Tensiometric scheduling (T1 and T2) treatments, during two years and on two fields (A and B).

Field	Year	Treatment	Total Yield (T DM-1 ha-1)	Yield 1st mowing (T ha-1)	Yield 2nd mowing (T ha-1)	Yield 3rd mowing (T ha-1)	WUE* (kg-1 ha-1 m-3 water)/Ea
A	2004	Control	8.1	3.4	3.3	1.4	1.63
		T1	6.5	3.7	2.1	0.7	1.37
	2005	Control	7.4	4.2	2.4	0.7	1.42
		T2	8.1	4.0	3.0	1.0	1.41
	2006	Control	9.4	4.7	2.9	1.9	1.46
		T2	11.6	6.5	2.9	2.2	1.67
B	2004	Control	6.8	2.3	3.8	0.6	1.46
		T1	6	2.6	3.0	0.2	0.99
	2005	Control	5.7	2.8	1.9	1.1	0.84
		T2	7.5	3.5	3.2	1.4	0.98
	2006	Control	7	2.0	2.0	0.6	NM
		T2	8.3	2.2	2.2	0.6	NM

Fig. 5. Relationship between the average fraction of transpirable soil water (FTSW expressed in percent of TTSW) during a growing period, and forage yield ($\text{T DM}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) (a) or Water Use Efficiency (kg DM m^{-3}) (b). The numbers next to the points correspond to the order of mowing. WUE was calculated for each mowing.



ANNEXE 7 : CONTRIBUTIONS DU TRAVAIL DE THESE AU QUESTIONS SCIENTIFIQUES POSEES DANS LE CHAPITE I

	Thèmes de la discussion qui répondent en partie à la question					Questions partiellement traitées ou non traitées dans cette thèse mais abordées en Perspectives	Questions non traitées
Questions posées dans le cadre de ma thèse	Systèmes prairiaux et déficit hydrique	Plurispécificité	Modélisation de l'eau du sol et de l'avancement	Efficiences d'irrigation et économies d'eau	Coordination des méthodes d'étude	Vers la construction d'un simulateur du système de culture irrigué	
Gestion de l'eau							
1. Comment fonctionne le système sol-plante-eau ?	X						
2. Quelles méthodes pour piloter l'irrigation et pour améliorer l'efficacité d'irrigation ?	X			X			
3. Quelles connaissances sur la gestion quantitative et qualitative de l'eau en rapport avec l'environnement ?	X			X			X (gestion qualitative de l'eau)
4. Quelles relations entre gestion de l'eau, sécheresse et changement climatique ?							X
5. Quels outils d'évaluation des systèmes de culture irrigués ?			X		X		
Systèmes de culture plurispécifiques							
6. Comment fonctionnent les systèmes plurispécifiques ?	X	X					
7. Quels critères d'évaluation des systèmes plurispécifiques ?							X
8. Comment évaluer l'impact des pratiques sur les systèmes plurispécifiques ?	X	X					
9. Comment coordonner les méthodes d'études pour concevoir des systèmes plurispécifiques ?					X		
Systèmes de culture prairiaux irrigués							
10. Quelles différences de sensibilité au dessèchement des types de végétation prairiaux ?	X	X					
11. Quels changements consécutifs à des périodes de sécheresse ?							X
12. A partir de quels seuils de déficits hydriques observe-t-on un stress hydrique ?	X						
13. Quels modes de conduite des systèmes prairiaux irrigués ?	X			X			
14. Comment simuler les systèmes prairiaux irrigués – relation sol-plante au travers de l'eau ?			X				
Systèmes de culture assistés par des modèles							
15. Quelles connaissances pour modéliser les					X		

systèmes de culture ?							
16. Comment intégrer les différentes échelles ?					X	X	
17. Comment évaluer la valeur prédictive des modèles ?						X	
18. Comment formaliser les règles de décision ?						X	
19. Quel domaine de validité ?						X	
20. Comment coupler les modèles ?						X	

XI. RESUME

Ce travail propose d'analyser et de modéliser le fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué par gravité. Il est appliqué aux prairies plurispécifiques de Crau. Le système étudié est découpé en deux sous-systèmes : le sous-système biophysique sol-plante-lame d'eau et le sous-système technique, décrit par les processus décisionnels des agriculteurs. L'approche systémique, nous a conduits à décomposer le système biophysique en compartiments interagissant entre eux et passant par une succession d'états. Cette approche structure les expérimentations et la modélisation numérique.

Nous montrons que la prairie plurispécifique est sensible en quantité et en qualité aux déficits hydrique courts et modérés et que l'irrigation peut être pilotée à partir du potentiel matriciel et de la fraction d'eau du sol transpirable par la culture.

Les données expérimentales permettent d'améliorer et calibrer un modèle de lame d'eau basé sur une loi d'infiltration prédictive et un modèle de culture basé sur une approche des traits fonctionnels. La qualité de prédiction, obtenue par validation croisée, est satisfaisante par rapport à l'utilisation souhaitée du modèle, les effets du vent et de la plurispécificité sur le rendement ayant été intégrés.

Un modèle conceptuel des décisions est construit à partir d'une enquête sur le fonctionnement du système de production en adaptant le concept de 'modèle d'action' aux systèmes gravitaires et aux prairies.

Le couplage de ces modèles complètera ce travail afin d'élaborer un outil d'aide à la conception de systèmes de culture plus efficaces en termes d'usage de l'eau.

TITLE

Analysis and modelisation of the biophysical functioning and management of an irrigated grassland system – Application to the plurispecific grasslands of the Crau plain in order to build a Decision Support System.

SUMMARY

This work aimed at analysing and modelling the biophysical functioning and management of an irrigated grassland system. It is applied to a plurispecific grassland system irrigated by border system. The cropping system is composed of a biophysical sub-system (soil-plant- front of irrigation water) and a technical sub-system under the influence of a decisional system. The systemic approach at field scale helped at structuring the biophysical system into compartments in interaction.

This approach lets to structure the experiments and the numerical modelling. We showed that the plurispecific grasslands are sensitive to moderate water deficit in term of quantity and quality of hay. Irrigation can be scheduled based on the matric potential and the Fraction of Total Transpirable Soil Water.

The simulation of the crop functioning is based on a crop model designed to use function-fluxes approach and functional traits approach. The wind and plurispécificity effects on yield have been integrated. The modelisation of water advance trajectory during irrigation is realised with a predictive infiltration solution.

Adapting the concept of "model for action" to border irrigation and grasslands, a conceptual model of decisions is built from the results of a survey on the functioning of production system. The coupling of these three models is going to complete this work in order to elaborate a decision tool for conceiving cropping system more efficient in term of water use.

DISCIPLINE : Sciences Agronomiques

MOTS-CLES : système de culture, système décisionnel, système technique et biophysique, prairie plurispécifiques, irrigation gravitaire, modélisation, Aide à la Décision

UMR System (CIRAD-Inra-SupAgro), bâtiment 27, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2, France.